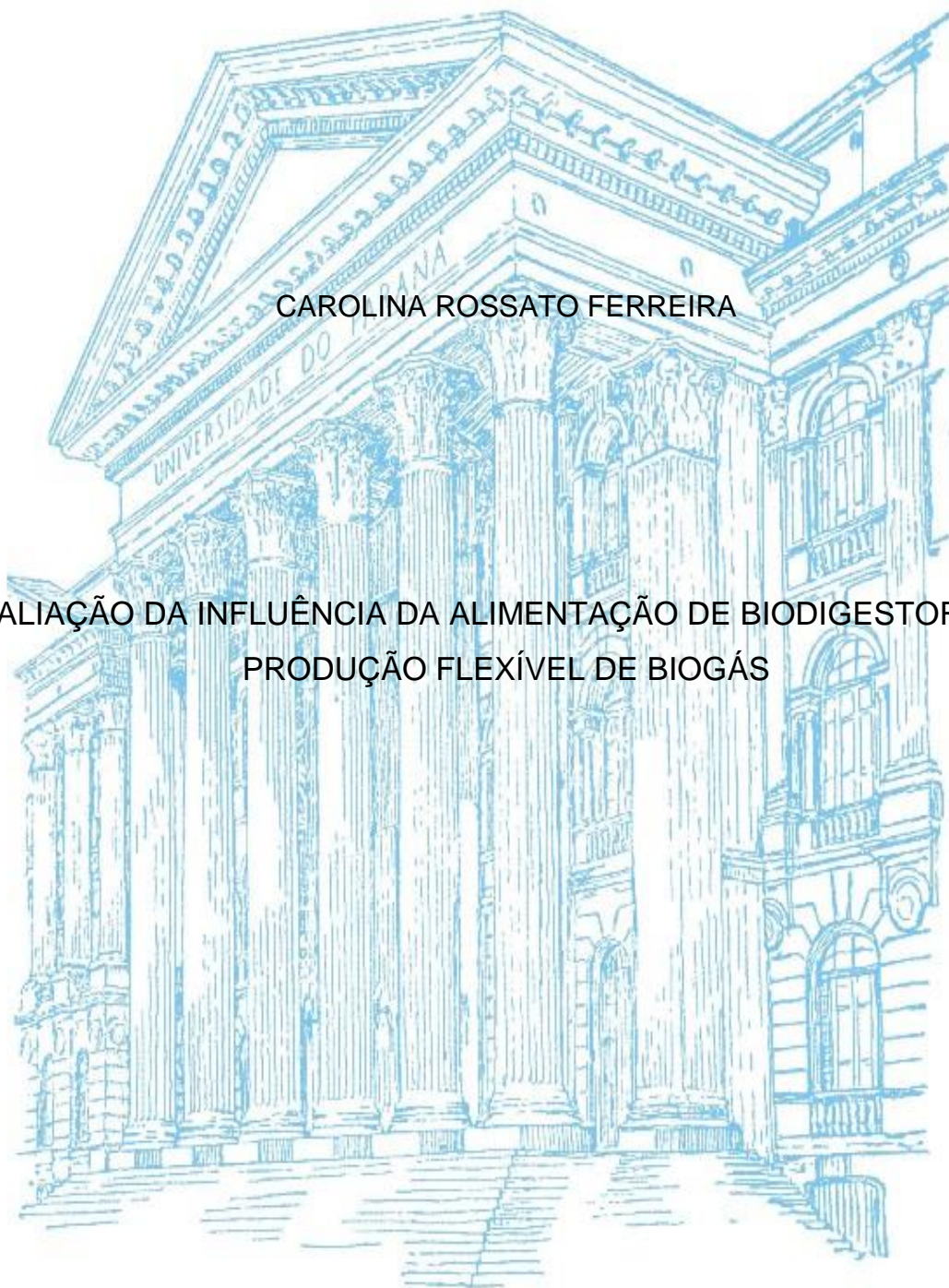


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

CAROLINA ROSSATO FERREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ALIMENTAÇÃO DE BIODIGESTORES NA
PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS



CURITIBA

2015

CAROLINA ROSSATO FERREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ALIMENTAÇÃO DE BIODIGESTORES NA
PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS

Dissertação apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais, no
Curso de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e
Industrial, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal
do Paraná.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Daniela Neuffer

Co-orientadores: Prof. Dr. Klaus Fischer

Prof^a. MSc. Marielle Feilstrecker

CURITIBA

2015

F383 Ferreira, Carolina Rossato.
Avaliação da influência da alimentação de biodigestores na produção flexível de biogás.
Curitiba, 2015.
80 f.: il.; tab., graf. 30 cm

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Curso de Pós-graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial.

Orientadora: Dra. .Daniela Neuffer --Co-Orientador: Dr. Klaus Fischer
Co-Orientadora: MSc. Marielle Feilstrecker
Bibliografia: f. 60-65

1. Energia – Fontes alternativas. 2. Biogás. 3. Biodigestores. 4. Lodo. I. Neuffer, Daniela. II. Fischer, Klaus. III. Feilstrecker, Marielle. IV. Universidade Federal do Paraná. V. Título.

CDU 620.91

TERMO DE APROVAÇÃO

CAROLINA ROSSATO FERREIRA

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ALIMENTAÇÃO DE BIODIGESTORES NA PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS

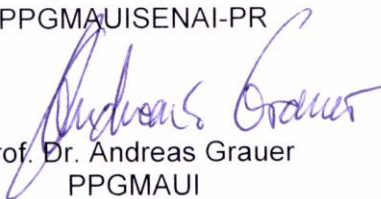
Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com SENAI/PR e a *Universität Stuttgart*, Alemanha, pela seguinte banca examinadora:



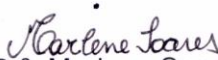
Prof^a. Dr^a. Daniela Neuffer
PPGMAUI/ISWA/UNI STUTT



Prof^a. MSc. Marielle Feilstrecker
PPGMAUISENAI-PR



Prof. Dr. Andreas Grauer
PPGMAUI



Prof^a. Dr^a. Marlene Soares
UTFPR



Prof^a. Dr^a. MARGARETE CASAGRANDE LASS ERBE
Coordenadora do TC/ PPGMAUI-UFPR

Curitiba, 05 de agosto de 2015.

AGRADECIMENTOS

À minha família e ao meu noivo, por serem meus principais incentivadores e me instigarem a sempre querer ir um pouco além.

Aos professores Dr^a. Daniela Neuffer e Dr. Klaus Fischer, pela orientação, apoio, disponibilidade e confiança para o desenvolvimento do projeto.

À professora MSc. Marielle Feilstrecker, pela amizade, palavras de incentivo e o apoio durante todas as etapas deste projeto, especialmente no seu término.

À amiga e colega Sara Schneider, por ter compartilhado seu tempo e seu conhecimento colaborando ativamente na realização deste trabalho.

Aos colegas de pós-graduação Ithiara Dalponte e Bárbara Smidarle pela amizade, companheirismo e colaboração recebida durante o curso.

Ao colega Wladimir Lopes, pela parceria e por ter me apresentado o PPGMAUI.

Aos funcionários do ISWA e do LFKW pela ajuda na execução deste trabalho.

Ao DAAD, pela bolsa de estudos concedida.

“Insanidade é continuar fazendo sempre a
mesma coisa e esperar resultados
diferentes.”

Albert Einstein

RESUMO

Nos anos recentes, o uso de fontes de energias renováveis, como eólica, solar, biomassa e hidrelétrica, cresceu ao redor do mundo. Todavia, um problema relacionado com essas fontes de energia é que elas podem apresentar um fornecimento intermitente. Uma opção versátil para compensar as diferenças entre a demanda e o fornecimento de energia por outras fontes renováveis é o uso da produção flexível do biogás. Neste contexto, o objetivo desse trabalho foi de avaliar a influência da alimentação de uma mistura de cereais e lodo digerido na produção flexível de biogás. Os experimentos foram realizados em um reator anaeróbico piloto de 250 l, com temperatura de operação mantida na faixa de 31 ± 1 °C, com uma alimentação diária e cargas orgânicas volumétricas progressivas da mistura a ser testada (0,70, 0,94, 1,19 e 1,43 g_{MOS}/(l·d)). As condições do processo analisadas durante o experimento foram: a temperatura de operação do reator, o volume e a composição do gás produzido, o pH, o teor de matéria seca e o teor de matéria orgânica seca do lodo formado no biodigestor. Os resultados mostraram que o aumento da carga volumétrica utilizada provocou o crescimento da produção de gás, mas também a redução do teor de metano do biogás de 58% para até 46%. O rendimento de metano no biogás produzido variou de 188,31 Nm³/t_{MOS} a 201,59 Nm³/t_{MOS}. A taxa de degradação do substrato apresentou valores médios de 69%. Não foi possível observar uma tendência similar de crescimento do volume de gás entre os experimentos realizados. Após 96 h sem alimentação, a produção de gás seguiu uma tendência de decaimento logarítmico. A comparação dos resultados obtidos com os de um estudo similar, mostrou que a mistura utilizada para a co-digestão nesse trabalho apresenta um maior potencial para a produção flexível. Todavia, por se tratar de um assunto recente, os estudos de flexibilidade e de produção orientada com a demanda ainda carecem da criação de critérios e valores de referência a serem seguidos para atingir a flexibilidade.

Palavras-chave: Energia renovável. Co-digestão. Lodo digerido. Mistura de cereais. Produção orientada com a demanda.

ABSTRACT

In recent years, the use of energy from renewable sources like wind, solar, biomass and hydropower, increased around the world. However, a problem related to these energy sources is that they can provide an intermittent power supply. A versatile option to compensate the discrepancy between the demand and the energy supply from other renewable sources is the use of flexible production of biogas. In this context, the aim of this study was to evaluate the influence of feeding a mixture of cereals and digested sludge in a flexible production of biogas. The experiments were performed in a pilot anaerobic reactor of 250 l, with operating temperature maintained in the range of 31 ± 1 °C, with daily feeding and step by step increasing volume loads of the mixture to be tested (0.70, 0.94, 1.19 and 1.43 g_{ODS}/(l·d)). The process conditions analyzed during the experiment were: the reactor operating temperature, the volume and the composition of the produced gas, pH, dry matter content and the organic dry matter content of the sludge formed in the digester. The results showed that the use of higher volume loads caused an increase of the gas production but also a reduction of the methane content up 58% to 46%. Methane yield in the produced biogas varied from 188.31 Nm³/t_{ODS} to 201.59 Nm³/t_{ODS}. The average substrate degradation rate was 69%. It was not possible to observe a similar trend in the growth of volume of gas between the experiments. After 96 h without feeding, the gas production follows a logarithmic decay. The comparison of results obtained with a similar study showed that the mixture used for the co-digestion in this work has a higher potential for flexible production. However, because it is a recent issue the studies related to flexible and the demand driven production still require the establishment of criteria and benchmarks to be followed, in order to be achieve flexibility.

Keywords: Renewable energy. Co-digestion. Digested sludge. Cereal mixture. Demand driven production.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA	19
FIGURA 2 - VELOCIDADE DE CRESCIMENTO DOS MICRORGANISMOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA	22
FIGURA 3 - PLANTA PILOTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM LFKW/ISWA.....	31
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DA PLANTA PILOTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS ..	32
FIGURA 5 - AMOSTRAS UTILIZADAS: (A) SUBSTRATO E (B) CO-SUBSTRATO.	33
FIGURA 6 - FRAÇÕES DAS MISTURAS DE CEREAIS: (A,E) AVEIA, (B,F) CEVADA, (C,G) TRIGO, (D,H) IMPUREZAS DA MC-1 E DA MC-2	33
FIGURA 7 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS MEDIÇÕES DA CORRENTE GASOSA.....	36
FIGURA 8 – ESQUEMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	37
FIGURA 9 - GRÁFICOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE EM FUNÇÃO DO TEMPO DO EXPERIMENTO 1: (A) TEMPERATURA (°C), (B) pH, (C) MS (%) E (D) MOS (%)	39
FIGURA 10 - GRÁFICOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE EM FUNÇÃO DO TEMPO DO EXPERIMENTO 2: (A) TEMPERATURA (°C), (B) pH, (C) MS (%) E (D) MOS (%)	40
FIGURA 11 - GRÁFICOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE EM FUNÇÃO DO TEMPO DO EXPERIMENTO 3: (A) TEMPERATURA (°C), (B) pH, (C) MS (%) E (D) MOS (%)	41
FIGURA 12 - VOLUME DIÁRIO DE GÁS PRODUZIDO DURANTE OS 52 DIAS DE ESTUDO	42
FIGURA 13 - TEOR DE METANO EM FUNÇÃO DO TEMPO.....	44
FIGURA 14 - TEOR DE METANO MÉDIO EM FUNÇÃO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA	44
FIGURA 15 - TAXA DE DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO	46
FIGURA 16 - TAXA DE DEGRADAÇÃO MÉDIA EM FUNÇÃO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA ALIMENTADA	47
FIGURA 17 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 0,70 g _{MOS} /(l·d)	49
FIGURA 18 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 0,94 g _{MOS} /(l·d)	50
FIGURA 19 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 1,19 g _{MOS} /(l·d)	51

FIGURA 20 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 1,43 g _{MOS} /(l·d)	51
FIGURA 21 - GRÁFICO DO VOLUME ACUMULADO DE GÁS PRODUZIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O EXP. 1	52
FIGURA 22 - GRÁFICO DO VOLUME ACUMULADO DE GÁS PRODUZIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O EXP. 2	53
FIGURA 23 - GRÁFICO DO VOLUME ACUMULADO DE GÁS PRODUZIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O EXP. 3	53
FIGURA 24 - COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE GÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE 1,14 g _{MOS} /(l·d)	54
FIGURA 25 - COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE GÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE 1,45 g _{MOS} /(l·d)	55
FIGURA 26 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE OS INTERVALOS SEM ALIMENTAÇÃO DO REATOR	57

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO BIOGÁS E DO METANO	21
QUADRO 2 - RENDIMENTO MÁXIMO E QUANTIDADE TEÓRICA DE METANO ..	25
QUADRO 3 - VALORES TÍPICOS DE RENDIMENTO DE METANO PARA CO- SUBSTRATOS DE INTERESSE.....	26
QUADRO 4 - VISÃO GERAL DO SUBSTRATO E DOS CO-SUBSTRATOS ALIMENTADOS NO REATOR DURANTE OS EXPERIMENTOS	34
QUADRO 5 - RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE SCHNEIDER (2015) E A AUTORA (2015).....	38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DAS MISTURAS DE CEREAIS UTILIZADAS	.34
TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO LODO DIGERIDO E DAS MISTURAS DE CEREAIS.....	34
TABELA 3 - VALORES MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE MONITORADAS.....	42
TABELA 4 - CÁLCULO DO RENDIMENTO DE METANO	45
TABELA 5 - COMPARATIVO ENTRE OS DADOS DE PRODUÇÃO DE GÁS PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE 1,14 g _{MOS} /(l·d)	54
TABELA 6 - COMPARATIVO ENTRE OS DADOS DE PRODUÇÃO DE GÁS PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE 1,45 g _{MOS} /(l·d)	55
TABELA 7 - DECRÉSCIMO DA PRODUÇÃO DE GÁS DURANTE OS INTERVALOS 1 E 2.....	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CH ₄	– Gás metano
CNTP	– Condições Normais de Temperatura e Pressão (273 K e 1,013 bar)
COV	– Carga Orgânica Volumétrica (g _{MOS} /(l·d))
CO ₂	– Gás carbônico
C(1,11)	– Mistura de cereais com carga orgânica volumétrica de 1,11 g _{MOS} /(l·d)
C(1,45)	– Mistura de cereais com carga orgânica volumétrica de 1,45 g _{MOS} /(l·d)
DQO	– Demanda Química de Oxigênio
EEG	– Lei alemã de energias renováveis (<i>Erneuerbare-Energien-Gesetz</i>)
Exp.	– Experimento
H ₂	– Gás hidrogênio
H ₂ S	– Sulfeto de hidrogênio
ISWA	– Instituto de Engenharia Sanitária, Gerenciamento da Qualidade de Água e de Resíduos (<i>Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Universität Stuttgart</i>)
LFKW	– Estação de tratamento de efluentes de ensino e pesquisa (<i>Lehr- und Forschungsklärwerk</i>)
M(1,13)	– Silagem de milho com carga orgânica volumétrica de 1,13 g _{MOS} /(l·d)
M(1,48)	– Silagem de milho com carga orgânica volumétrica de 1,48 g _{MOS} /(l·d)
MC(1,19)	– Mistura de cereais com carga orgânica volumétrica de 1,19 g _{MOS} /(l·d)
MC(1,43)	– Mistura de cereais com carga orgânica volumétrica de 1,43 g _{MOS} /(l·d)
MC-1	– Mistura de cereais 1
MC-2	– Mistura de cereais 2
m _{ENTRADA}	– Massa de substrato adicionado ao processo (t)
MF	– Massa Fresca de substrato (t)
m _{SAÍDA}	– Massa de biofertilizantes (t)
MOS	– Teor de Matéria Orgânica Seca (%)
MOS _{SAÍDA}	– Teor de matéria orgânica seca do substrato na saída do processo (kg/t _{MF})
MOS _{SUB}	– Teor de matéria orgânica seca do substrato na entrada do processo (kg/t _{MF})

MS	– Teor de Matéria Inorgânica Seca (%)
NH ₃	– Amônia
N ₂	– Gás nitrogênio
η_{MOS}	– Taxa de degradação de biomassa (%)
pH	– Potencial hidrogeniônico
SO ₂	– Dióxido de enxofre
T	– Temperatura (°C)
TRH	–Tempo de Retenção Hidráulica (d)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	PRODUÇÃO DE BIOGÁS	18
3.2	COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS	20
3.3	VARIÁVEIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	21
3.3.1	Temperatura	22
3.3.2	pH	23
3.3.3	Carga orgânica volumétrica e tempo de retenção hidráulica	24
3.3.4	Substratos	24
3.3.5	Taxa de degradação do substrato	27
3.4	PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS	28
3.5	ESTUDO DE CASO DO GERENCIAMENTO DA ALIMENTAÇÃO DE BIODIGESTORES	29
4	MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1	SISTEMA EXPERIMENTAL E SUBSTRATOS	31
4.2	REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	35
4.3	AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS	38
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA	39
5.1.1	Quantidade do gás produzido	42
5.1.2	Composição do gás produzido	43
5.1.3	Taxa de degradação do substrato	46
5.2	AVALIAÇÃO DA FLEXIBILIDADE DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	48
5.2.1	Avaliação da produção de gás nos dias sem alimentação do reator	56
6	CONCLUSÃO	59

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60
APÊNDICE – DADOS HORÁRIOS BRUTOS.....	66

1 INTRODUÇÃO

Energias renováveis são, por definição, limpas e sustentáveis e possuem o potencial de superar a degradação gradual das tradicionais energias fósseis e os seus impactos ambientais associados (CHEN *et al.*, 2010). Essas fontes oferecem diversas opções com as quais é possível suprir a demanda de energia, principalmente quando considerados conjuntamente os aspectos sociais e ambientais para o desenvolvimento econômico (PEREIRA *et al.*, 2012).

Nos últimos anos, o uso de fontes de energias renováveis como eólica, solar, biomassa e hidrelétrica, cresceu substancialmente ao redor do mundo (BLAZEJCZAK *et al.*, 2014; CHEN *et al.*, 2010; HAHN *et al.*, 2014). Entretanto, algumas destas fontes, como a energia solar e a energia eólica, podem apresentar uma geração intermitente, além de uma disponibilidade variável e apenas parcialmente previsível, podendo variar tanto espacialmente quanto temporalmente (EHRLICH, 2013; SCHABER; STEINKE; HAMACHER, 2012).

Alternativas para assegurar o fornecimento contínuo de energia e a estabilidade da rede são necessárias e os processos de digestão anaeróbica podem ser uma solução para esses problemas (SZARKA *et al.*, 2013). Conhecida e utilizada por muitas décadas, a digestão anaeróbica tem recebido interesse renovado ultimamente por causa do aumento do consumo de energia, dos incentivos à produção de energia renovável e da necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008). Além disso, devido às suas características de pequeno porte, a energia a partir da biomassa está disponível de maneira descentralizada e largamente distribuída, podendo desta forma contribuir para a estabilização da rede (MAUKY *et al.*, 2015).

Para balancear as divergências entre o consumo e o fornecimento de energia de outras fontes renováveis as plantas de produção de biogás devem adotar uma produção orientada com a demanda (LUND *et al.*, 2012). Ou seja, ao invés de uma produção contínua de energia as plantas de produção de biogás devem produzi-la em períodos em que a necessidade por energia é maior (MAUKY *et al.*, 2015). A produção de biogás orientada pode ser geralmente obtida pelo armazenamento de biogás, pelos conceitos de produção flexível ou pela combinação de ambos (HAHN *et al.*, 2014).

Uma das metodologias básicas para a produção flexível de energia em plantas de biogás é o gerenciamento do regime de alimentação do biodigestor (SZARKA *et al.*, 2013). A variação do tipo de substrato, os intervalos de alimentação e a vazão volumétrica alimentada podem influenciar o processo biológico para a produção de biogás (HAHN *et al.*, 2014). Cada um dos componentes da cadeia de produção tem suas próprias limitações, sendo que todas juntas resultam na flexibilidade geral do processo (MAUKY *et al.*, 2015).

Na Alemanha, a política de incentivos para a produção de energias renováveis proporcionou o aumento do número de estudos e dos investimentos nas plantas de produção flexível de biogás (WILKINSON, 2011; LUND *et al.*, 2012). Estudos promissores alemães demonstraram em escala piloto que a estabilidade geral do processo de biodigestão não foi afetada pela dinâmica da alimentação, produzindo sistemas altamente flexíveis (MAUKY *et al.*, 2015). Além disso, esse sistema possibilitou a redução da emissão de gases do efeito estufa e reduziu a necessidade de armazenamento de gás (HAHN *et al.*, 2014).

Neste contexto, este trabalho investigou a influência do gerenciamento da alimentação de uma planta piloto de produção flexível de biogás com alimentações diárias de lodo digerido e de uma mistura de cereais.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da alimentação de uma mistura de cereais e lodo digerido na produção flexível de biogás em um processo de digestão anaeróbica em reator piloto.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar o substrato e o co-substrato utilizados quanto ao teor de matéria seca (MS) e ao teor de matéria orgânica seca (MOS);
- Analisar o desempenho do processo de digestão anaeróbica no reator piloto (quantidade e a composição do biogás produzido, rendimento de metano (CH_4), taxa de degradação do substrato alimentado no reator);
- Avaliar a flexibilidade da produção de biogás em escala piloto em função das variações de carga orgânicas volumétricas testadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PRODUÇÃO DE BIOGÁS

O CH_4 é um gás incolor, inodoro e não tóxico e é um dos principais gases do efeito estufa (FNR, 2010). Sua formação ocorre por meio de um processo biológico que ocorre naturalmente quando o material orgânico (biomassa) se decompõe em uma atmosfera úmida na ausência de oxigênio, mas na presença de um grupo de microrganismos que são metabolicamente ativos, como as bactérias metanogênicas (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008). Na natureza, o metano é formado em pântanos, no trato digestivo de animais ruminantes, em plantas úmidas de compostagem e em campos alagados de arroz (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008; SCHLAGER; WEISBLATT, 2006).

Biogás é uma mistura de gases gerada no processo de fermentação e um de seus componentes é o CH_4 (FNR, 2010). A tecnologia de produção de biogás também é conhecida como tecnologia de digestão anaeróbica (SCHLAGER; WEISBLATT, 2006). Nos processos anaeróbicos podem ser aplicados uma ampla variedade de insumos industriais e urbanos incluindo águas residuárias, resíduos agrícolas, municipais, alimentícios e vegetais (WARD *et al.*, 2008).

A conversão de materiais orgânicos para o biogás requer quatro sucessivas etapas de degradação microbiana: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (HAHN *et al.*, 2014; APPELS *et al.*, 2008). A FIGURA 1 representa a sequência de etapas envolvidas no processo da decomposição anaeróbica.

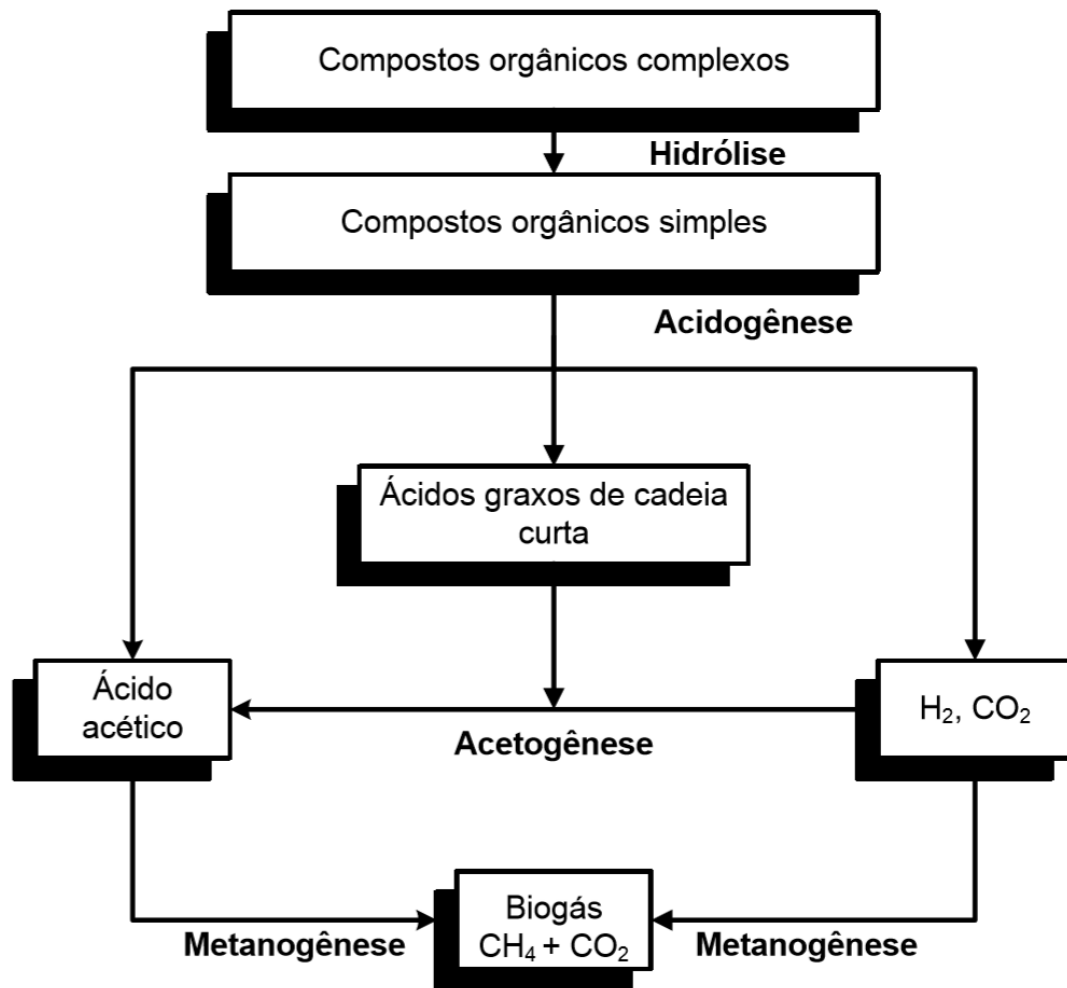


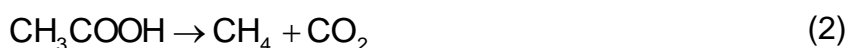
FIGURA 1 - ETAPAS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA
 FONTE: Adaptado de Appels *et al.* (2008) e FNR (2010)

A primeira etapa é a hidrólise, em que compostos orgânicos complexos, tais como carboidratos, proteínas e lipídios, são decompostos em substâncias menos complexas como aminoácidos, açúcares e ácidos graxos (FNR, 2010). No processo atuam bactérias hidrolíticas ou facultativas anaeróbicas e aeróbicas, cujas enzimas liberadas são capazes de realizar a quebra das ligações das moléculas complexas por meio de reações bioquímicas (GERARDI, 2003).

Na acidogênese, os produtos hidrolíticos formados são degradados a ácidos graxos de cadeias pequenas, dióxido de carbono (CO₂) e hidrogênio (H₂) por diferentes bactérias anaeróbicas (LV; SCHANBACHER; YU, 2010). Adicionalmente, formam-se também pequenas quantidades de ácido lático e álcoois (FNR, 2010).

Os produtos formados na etapa anterior são a matéria bruta para uma terceira etapa, a acetogênese. Esses compostos são convertidos, por um único grupo de bactérias anaeróbicas, as bactérias acetogênicas, em precursores do biogás (ácido acético, H₂ e CO₂) (FNR, 2010).

A última etapa da digestão anaeróbica, na qual o biogás é produzido, é conduzida por bactérias metanogênicas estritamente anaeróbicas (TORTORA; FUNKE; CASE, 2012). A metanogênese é a etapa central da produção de metano e pode seguir por duas vias principais, a metanogênese hidrogenotrófica (equação (1)) e a metanogênese acetoclástica (equação (2)) (LV *et al.*, 2014).



De modo geral, as quatro etapas da decomposição anaeróbica ocorrem paralelamente em um processo de um único estágio. No entanto, uma vez que as bactérias têm exigências diferentes quanto ao seu habitat, tais como o pH e a temperatura, deve ser definido um meio termo das condições operacionais para o desenvolvimento de todos os microrganismos envolvidos no processo (FNR, 2010).

Além do biogás produzido, depois que a digestão anaeróbica está completa, grandes quantidades de lodo não digerido ainda permanecem no biodigestor, embora sejam relativamente estáveis e inertes (TORTORA; FUNKE; CASE, 2012).

3.2 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS

A mistura gasosa formada nos processos de digestão anaeróbica apresenta uma composição média de CH₄ (55 – 70%), de CO₂ (30 - 45%) e alguns traços de amônia (NH₃), de nitrogênio (N₂), de dióxido de enxofre (SO₂) e de sulfeto de hidrogênio (H₂S) (SCHLAGER; WEISBLATT, 2006; FNR, 2010). Coletivamente, esses gases são chamados de gás de biodigestão ou biogás (GERARDI, 2003). As características gerais do biogás e do metano podem ser observadas no QUADRO 1.

Parâmetros	Biogás	Metano
Poder calorífico inferior (kcal/m ³)	5160	8598
Densidade (kg/m ³)	1,20	0,72
Densidade relativa do ar	0,90	0,55
Temperatura de ignição (°C)	700	600
Limites de explosividade (%vol)	6,0 – 22,0	4,4 - 16,5

QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS GERAIS DO BIOGÁS E DO METANO

FONTE: Adaptado de Bundesverband der Landwirtschaftlichen Berufsgenossenschaften (2008)

O metano é considerado o componente de maior relevância do biogás, pois ele representa a sua parte combustível (MAUKY *et al.*, 2015). Portanto, percebe-se que de acordo com os dados mostrados no QUADRO 1, que é preferível que a composição principal do biogás seja desse gás, uma vez que ele determina consideravelmente o poder calorífico da mistura (DIEKMANN; ROSENTHAL, 2014).

3.3 VARIÁVEIS DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Como em todos os processos biológicos, a manutenção das condições de sobrevivência dos microrganismos é importante (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008). Os sistemas anaeróbicos têm a tendência a serem instáveis, principalmente devido a sobrecargas ou condições operacionais inapropriadas (GOLKOWSKA; SIBISI-BEIERLEIN; GREGER, 2012).

Bactérias formadoras de metano são estritamente anaeróbicas e são extremamente sensíveis a mudanças no pH, na alcalinidade e na temperatura (GERARDI, 2003). Além dos fatores já citados, uma série de outras variáveis pode influenciar o processo de produção de biogás, entre eles pode-se citar: as cargas orgânicas volumétricas alimentadas, o tempo de retenção hidráulica e os tipos dos substratos alimentados (HAHN *et al.*, 2014; DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008).

3.3.1 Temperatura

O crescimento bacteriano é afetado pela temperatura da mesma forma que outras reações químicas. Com o aumento da temperatura, a taxa metabólica aumenta e de maneira análoga a redução da temperatura pode causar o decréscimo das taxas metabólicas (MC KINNEY, 2004). Cada espécie bacteriana cresce a uma temperatura mínima, ótima e máxima específica. As velocidades de crescimento características em função da temperatura para diferentes tipos de microrganismos são apresentadas na FIGURA 2.

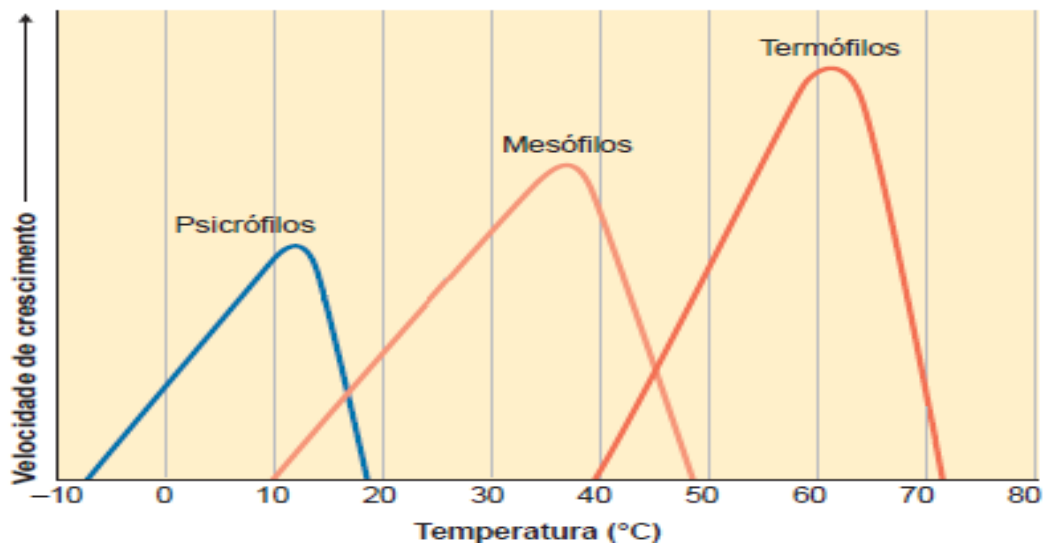


FIGURA 2 - VELOCIDADE DE CRESCIMENTO DOS MICRORGANISMOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

FONTE: Adaptado de Tortora; Funke; Case (2012)

Conforme pode ser observado na FIGURA 2, os microrganismos são classificados em três grupos principais com base em sua faixa preferida de temperatura (TORTORA; FUNKE; CASE, 2012):

- psicrófilos: crescem em baixas temperaturas, inferiores a 20°C;
- mesófilos: crescem em temperaturas moderadas, em torno de 10°C a 50°C, com a faixa ótima entre 37 e 42°C;
- termófilos: crescem em altas temperaturas, entre 40 e 70°C.

Não existe um limite rígido entre as faixas de temperatura que determinam essa faixa microbiana. Entretanto, o processo depende fortemente de uma temperatura constante e não do seu valor absoluto (FNR, 2010). Pequenas variações na temperatura podem causar um decréscimo na atividade das bactérias metanogênicas e por isso a variação da temperatura deve ser mantida em uma faixa máxima em torno de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008).

A maior parte dos microrganismos metanogênicos pertence ao grupo dos mesófilos e apenas alguns são termófilos (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008). A estrutura da atividade microbiana dessas duas comunidades é bastante diferente. Uma mudança de condições mesófilas para condições termófilas (ou ao contrário) pode resultar em uma queda drástica na produção de biogás até que a população microbiana cresça em número e a produção seja reestabelecida (WARD *et al.*, 2008).

3.3.2 pH

O pH se refere a acidez ou alcalinidade de uma solução. Esse parâmetro tem grande influência na atividade enzimática e no desempenho do biodigestor (GERARDI, 2003). Pois, tal como acontece com a temperatura, os microrganismos envolvidos na digestão anaeróbica têm um pH ótimo de operação de acordo com a fase de produção do biogás (FNR, 2010).

A maioria das bactérias cresce melhor em uma faixa estreita de pH perto da neutralidade, entre pH 6,5 e 7,5. Poucas bactérias crescem em um pH ácido abaixo de 4,0 (TORTORA; FUNKE; CASE, 2012). Uma atividade enzimática aceitável para as bactérias hidrolíticas e acidogênicas ocorre em pH superior a 5,0 (GERARDI, 2003). Já a formação do metano ocorre em um intervalo de pH relativamente estreito, de aproximadamente 6,5 a 8,5 com uma faixa ótima entre 7,0 e 8,0.

O processo é severamente inibido se o pH decresce para valores inferiores a 6,0 ou aumenta acima de 8,5 (WEILAND, 2010). Quando o pH diminui, a produção de ácidos orgânicos leva a uma futura redução do pH pelas bactérias hidrolíticas e pode causar a interrupção do processo de fermentação (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008).

3.3.3 Carga orgânica volumétrica e tempo de retenção hidráulica

Um dos parâmetros mais importantes no processo contínuo de digestão anaeróbica é a carga orgânica volumétrica (COV) (POHL; HEEG; KUMME, 2013). Este parâmetro informa quantos quilos de matéria orgânica seca (MOS) pode ser alimentada no reator por volume de trabalho, por unidade de tempo (KALTSCHMITT; HARTMANN, 2001). A carga volumétrica é representada em $\text{kg}_{\text{MOS}}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ (FNR, 2010).

A COV alimentada é um importante parâmetro do processo por direcionar uma capacidade de decomposição a um custo apropriado (FNR, 2010). Por isso, é necessário identificar a COV ótima para cada sistema de produção de biogás (POHL; HEEG; MUMME, 2013).

Outro parâmetro operacional relevante é o tempo de retenção hidráulica (TRH) (GERARDI, 2003). O TRH é o tempo médio calculado que um substrato permanece no biodigestor até a sua saída. Para calculá-lo, divide-se o volume do reator pelo volume de substrato alimentado diariamente no reator (FNR, 2010).

TRHs típicos devem ser maiores do que 12 dias devido ao tempo necessário para que as bactérias formadoras de metano dupliquem a sua população (GERARDI, 2003). Valores de TRH inferiores a 10 dias não são recomendados, pois caso o TRH seja muito curto, os microrganismos terão pouco tempo para decompor a matéria orgânica e conseqüentemente haverá uma formação insuficiente de biogás (FNR, 2010).

A COV e o TRH estão diretamente relacionados, pois a partir de uma composição constante do substrato, quanto maior a COV, maior será a concentração de substrato no interior do reator, o que leva a uma redução proporcional do TRH (FNR, 2010; POHL; HEEG; MUMME, 2013).

3.3.4 Substratos

Toda biomassa apta de ser fermentada recebe o nome de substrato (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008). A quantidade e a composição de biogás

produzido são determinadas principalmente pelos substratos utilizados neste processo (DIEKMANN; ROSENTHAL, 2014; SOUZA, 2010). Diferentes substratos podem ser utilizados para a produção de biogás, incluindo: estrume, resíduos urbanos orgânicos, resíduos de indústrias de processamento de alimentos, resíduos agrícolas e culturas energéticas (APPELS *et al.*, 2011).

Geralmente, os substratos podem ser caracterizados por conter como principais componentes químicos: lipídios, proteínas, carboidratos e fibras, como a celulose, hemicelulose e lignina (HAHN *et al.*, 2014). O rendimento teórico da produção de biogás em função desses componentes pode ser observado no QUADRO 2.

Substratos	Biogás (Nm ³ /t _{MOS} ¹)	CH ₄ (Nm ³ /t _{MOS} ¹)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)
Carboidratos ²	710 – 720	355 - 360	50	50
Proteínas	630	448	70	30
Gorduras	1080 – 1125	735 - 765	67	33

QUADRO 2 - RENDIMENTO MÁXIMO E QUANTIDADE TEÓRICA DE METANO

FONTE: Adaptado de Baserga (1998); ATV-DVWK-M 363 (2002), apud Neuffer (2004)

NOTA: ¹ CNTP: 273 K, 1,013 bar

² Apenas polímeros de hexoses, não incluídos inulinas e mono hexoses

Conforme observa-se no QUADRO 2, uma sequência das moléculas com maior para menor rendimento de biogás são: gorduras, carboidratos e proteínas. A sequência está baseada no tempo de degradação destas moléculas (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008).

As gorduras fornecem o maior rendimento de biogás, mas elas demandam um longo tempo de degradação devido à sua limitada biodisponibilidade. Já os carboidratos e as proteínas possuem um menor tempo de digestão, porém um menor rendimento na produção de gás (WEILAND, 2010).

Outros compostos como a lignina, o principal constituinte da madeira, e a maioria dos polímeros orgânicos sintéticos (plásticos), é decomposta tão lentamente que seu rendimento de produção de biogás tende a zero. (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008).

De maneira geral, todos os tipos de biomassa podem ser utilizados como substratos para a produção de biogás. Todavia, é importante que os seguintes pontos sejam levados em consideração na seleção do substrato (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008):

- o teor de substâncias orgânicas deve ser apropriado para o processo fermentativo selecionado;
- o valor nutricional de substâncias orgânicas, portanto o potencial de formação do gás, deve ser o mais alto o possível;
- o substrato deve ser livre de patógenos e outros microrganismos devem ser inócuos ao processo de fermentação;
- a presença de substâncias inibidoras deve ser baixa o suficiente para permitir que o processo de fermentação aconteça de maneira adequada;
- a composição do biogás produzido deve ser apropriada para aplicações futuras;
- a composição do resíduo fermentado deve ser tal que ele possa ser utilizado, por exemplo, como fertilizante.

Atualmente, várias plantas de produção de biogás vêm realizando a combinação entre um substrato e um co-substrato, matéria-prima com maior potencial de produção de metano, para aumentar o rendimento do biogás produzido (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008). Valores típicos encontrados para o rendimento de metano para alguns co-substratos de interesse são apresentados no QUADRO 3.

Co-substrato	Rendimento de metano (Nm ³ / t _{MOS}) ¹	
	Braun (2007)	FNR (2010)
Aveia grão	225 - 265	-
Centeio grão	254 - 442	319
Cevada	317 - 591	-
Grãos de cereais	-	389
Silagem de grãos	-	316
Silagem de milho	184 - 404	340
Trigo grão	345 - 383	-

QUADRO 3 - VALORES TÍPICOS DE RENDIMENTO DE METANO PARA CO-SUBSTRATOS DE INTERESSE

FONTE: Adaptado de Braun (2007) e de FNR (2010)

NOTA: ¹ CNTP: 273 K, 1,013 bar

Conforme observa-se no QUADRO 3, entre os principais co-substratos utilizados pode-se citar: resíduos agrícolas como folhas e resíduos vegetais, milho, beterraba e trigo (APPELS *et al.*, 2011; WANG *et al.*, 2009). Isto porque, além de oferecerem um grande potencial para a geração de biogás, eles são produzidos em

larga escala, apresentam uma grande disponibilidade e um baixo custo de produção (FERREIRA *et al.*, 2014).

3.3.5 Taxa de degradação do substrato

A taxa de degradação do substrato é um dos parâmetros utilizados para descrever o desempenho do processo anaeróbico, pois define a eficiência no aproveitamento do substrato. A taxa de degradação pode ser determinada tanto em virtude da demanda química de oxigênio (DQO) quanto da MOS. Devido aos processos analíticos utilizados na prática experimental, recomenda-se a determinação da taxa de degradação com base na MOS. A taxa de degradação pode ser calculada de acordo com a equação (3) (FNR, 2010):

$$\eta_{MOS} (\%) = \frac{MOS_{SUB} \cdot m_{ENTRADA} - MOS_{SAÍDA} \cdot m_{SAÍDA}}{MOS_{SUB} \cdot m_{ENTRADA}} \cdot 100 \quad (3)$$

Em que:

η_{MOS}	taxa de degradação da biomassa (%);
MOS_{SUB}	teor de matéria orgânica seca do substrato na entrada do processo (kg/ t _{MF});
$m_{ENTRADA}$	massa de substrato adicionada ao processo (t);
$MOS_{SAÍDA}$	teor de matéria orgânica seca do substrato na saída do processo (kg/ t _{MF});
$m_{SAÍDA}$	massa dos biofertilizantes (t).

Sabe-se que a degradação completa da matéria orgânica seca só é possível teoricamente, devido à grande dificuldade de degradação da lignina, presente na biomassa (DEUBLEIN; STEINJAUSER, 2008).

3.4 PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS

Na Alemanha, o apoio financeiro pela Lei de Energias Renováveis (*Erneuerbare-Energien-Gesetz* ou EEG) levou a um crescimento no número de plantas de produção de biogás. Essas instalações foram desenhadas e construídas para produzir quantidades estáveis e constantes de energia. Entretanto, com as mudanças nas condições do setor energético alemão as plantas de produção de biogás precisam atender novos requisitos, principalmente o fornecimento de eletricidade flexível (LUND *et al.*, 2012).

Ao invés da produção contínua de energia, toma o lugar uma produção durante períodos diferentes do dia com maiores taxas de conversão de biogás em energia elétrica nos períodos de maior demanda, a produção flexível. De maneira ideal, esses períodos devem coincidir com os períodos do dia em que a demanda por eletricidade é maior. O principal estímulo para essa alteração é que desde janeiro de 2012, novos incentivos financeiros para a produção flexível de biogás foram adotados na EEG (MAUKY *et al.*, 2015).

O prêmio de flexibilidade é pago pelo operador do sistema elétrico para os produtores de biogás, para que eles aumentem sua produção de energia elétrica quando existe necessidade no sistema (ALEMANHA, 2014). Este prêmio contempla ainda um apoio financeiro adicional para cobrir os investimentos com a adaptação da planta (HINSCH; HOLZAPFEL, 2013).

Um requisito fundamental para todos os conceitos de geração orientada com a demanda de energia é a garantia da disponibilidade do biogás sempre que é necessário gerar energia para balancear a rede e reduzir a produção ou armazenar o gás produzido durante períodos de excesso de produção (HAHN *et al.*, 2014).

A produção de energia orientada com a demanda pode ser obtida pelo armazenamento de biomassa na infraestrutura existente ou pelo desenvolvimento de alternativas técnicas e biológicas (SZARKA *et al.*, 2013). Os conceitos de armazenamento compreendem estocar o gás produzido no local da geração ou realizar o processo de biometanização e armazenar o metano produzido na rede de gás natural. Já, os de produção flexível de biogás podem ser obtidos por meio da alimentação variável do substrato, combinado com processos que podem ser realizados adicionalmente (HAHN *et al.*, 2014).

Conforme apresentado, na área da produção flexível de biogás existem diversas abordagens e o gerenciamento da alimentação apresenta grande relevância (HAHN *et al.*, 2014). Entre as alternativas relacionadas com o processo de alimentação do reator pode-se citar:

- desintegração ou pré-tratamento: são técnicas utilizadas para aumentar o processo de conversão da biomassa em energia (APPELS *et al.*, 2011). O aumento da biodegradabilidade do substrato pode ser realizado por meio de tratamentos mecânicos, químicos e térmicos (FERREIRA *et al.*, 2014; HENDRIKS; ZEEMAN, 2009; KRISCHANIA; VIJAY; CHANDRA, 2013);
- substratos utilizados: a produção de biogás pode apresentar grandes variações pela adição de substratos mais facilmente ou dificilmente degradados (GERHARDT, 2009; AMON *et al.*, 2007);
- gerenciamento da alimentação: adaptações realizadas no regime de alimentação no reator podem influenciar e regular o processo biológico no biodigestor (SZARKA *et al.*, 2013). Conceitos de carga orgânica e frequência de alimentação também são aplicados (HAHN *et al.*, 2014; MAUKY *et al.*, 2015).

No Brasil, diferentemente da Alemanha, o foco da produção de biogás tem sido apenas o de amenizar os efeitos poluidores dos dejetos animais, principalmente de suínos (SOUZA, 2010). Nesse sentido, tem-se que a tecnologia brasileira vista nos modelos de plantas de biogás existentes é tecnicamente defasada em relação a outros países (HORST; DIHL; FRANCISCO, 2013).

3.5 ESTUDO DE CASO DO GERENCIAMENTO DA ALIMENTAÇÃO DE BIODIGESTORES

O trabalho elaborado teve como base os estudos de Bauer (2013) e de Schneider (2015), ambos desenvolvidos nas instalações do *Lehr- und Forschungsklärwerk (LFKW)*, da Universidade de Stuttgart em Büsnau.

Bauer (2013) investigou o processo de fermentação da co-digestão de lodo primário de esgoto e de resíduos de alimentos em diferentes proporções (10 e 80%

de resíduos de alimentos). As experiências foram realizadas em um reator tanque de agitação contínua, sob condições mesófilas. Relatou-se que a produção máxima de biogás foi atingida após 30 minutos da alimentação do biodigestor, independente da mistura alimentada.

O estudo de Bauer (2013) avaliou também qual o melhor período para realizar uma nova alimentação no biodigestor a fim de não prejudicar a qualidade do gás. Este ponto foi localizado, utilizando-se 80% de resíduos de alimentos, após 12 h da primeira alimentação. Entretanto, este método levou a diminuição do teor de metano, mas a produção de biogás teve um aumento. Deste estudo fez-se uso de parte do sistema experimental, do biodigestor e do sistema de medição de gases.

Schneider (2015) investigou o gerenciamento da alimentação de biodigestores na codigestão de lodo digerido de estação de tratamento de efluentes e de diferentes co-substratos (silagem de milho e cereais) para a obtenção de uma produção de biogás flexível orientada conforme a demanda. O processo foi realizado em um biodigestor piloto operado com 210 l em um regime semi-contínuo e condições mesófilas de operação. Foram adicionadas diariamente 4 l de lodo digerido com quantidades progressivas dos co-substratos teste (80 g, 160 g, 240 g e 320 g).

Nos estudos de Schneider (2015), nos ensaios realizados com silagem de milho, o volume de gás produzido aumentou de 45 l para 90 l, quando as cargas orgânicas volumétricas (COVs) variaram de 1,13 para 2,17 g_{MOS}/(l·d). Enquanto, o teor de metano no biogás produzido caiu de 49% para 44% para as mesmas COVs. Já nos ensaios com a mistura de cereais o volume de gás variou de 150 l para 170 l e o teor de gás foi de 63% para 50%, quando as COVs foram de 1,11 a 2,12 g_{MOS}/(l·d) respectivamente. Sendo assim, para ambos os co-substratos, percebeu-se que tanto a quantidade quanto a qualidade do biogás produzido estão relacionadas com as COVs no biodigestor piloto.

Além disso, segundo os resultados observados por Schneider (2015), entre os co-substratos testados aquele que melhor atendeu os requisitos para uma produção flexível de biogás foi a mistura de cereais. Isto porque, a produção de biogás a partir da mistura de cereais apresentou um comportamento condizente com o que se espera de uma produção flexível, que é a geração e o declínio de uma determinada quantidade de biogás em um período de tempo definido, de forma a igualar a produção de biogás com a demanda de energia.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 SISTEMA EXPERIMENTAL E SUBSTRATOS

Os experimentos foram realizados em um biodigestor piloto, localizado nas instalações do *Lehr- und Forschungsklärwerk* (LFKW) do *Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft* (ISWA) da Universidade de Stuttgart em Büsnau, Alemanha. O biorreator utilizado foi do tipo tanque de mistura contínua, com capacidade máxima e volume de trabalho de 250 l. Tanto a alimentação quanto a recirculação do material no interior do biorreator foram realizadas por uma bomba helicoidal da marca *Netzsch* (modelo NM021BY01L06B).

A temperatura de operação foi mantida constante em torno de $31 \pm 1^\circ\text{C}$, para a manutenção das condições mesófilas. A temperatura era atingida e mantida estável com o auxílio de um banho termostático da companhia *Haake*. O dispositivo era composto por uma resistência elétrica (modelo S 21) e por um controlador digital (modelo SC 100). A água aquecida era bombeada até uma serpentina de aquecimento localizada no interior do reator, onde ocorria a troca de calor.

A FIGURA 3 apresenta a planta piloto de produção de biogás utilizada nos experimentos.

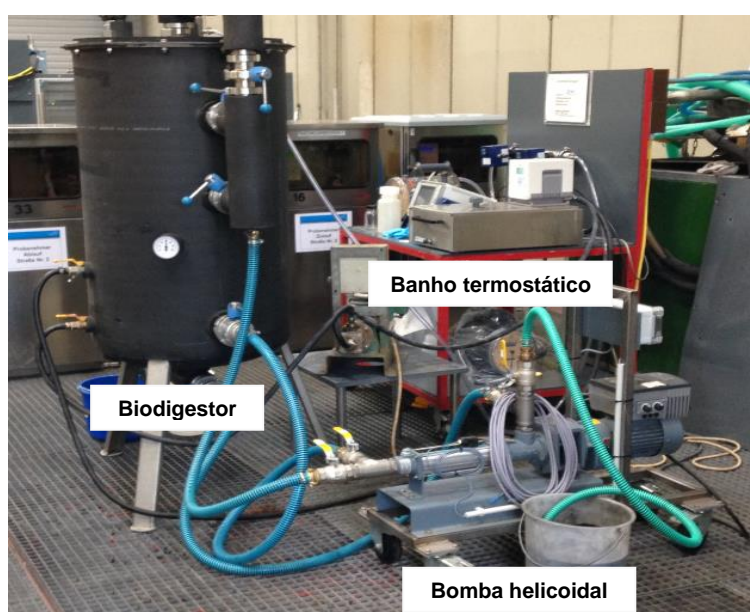


FIGURA 3 - PLANTA PILOTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM LFKW/ISWA

O funcionamento da planta piloto de produção de biogás pode ser visualizado no fluxograma mostrado na FIGURA 4.

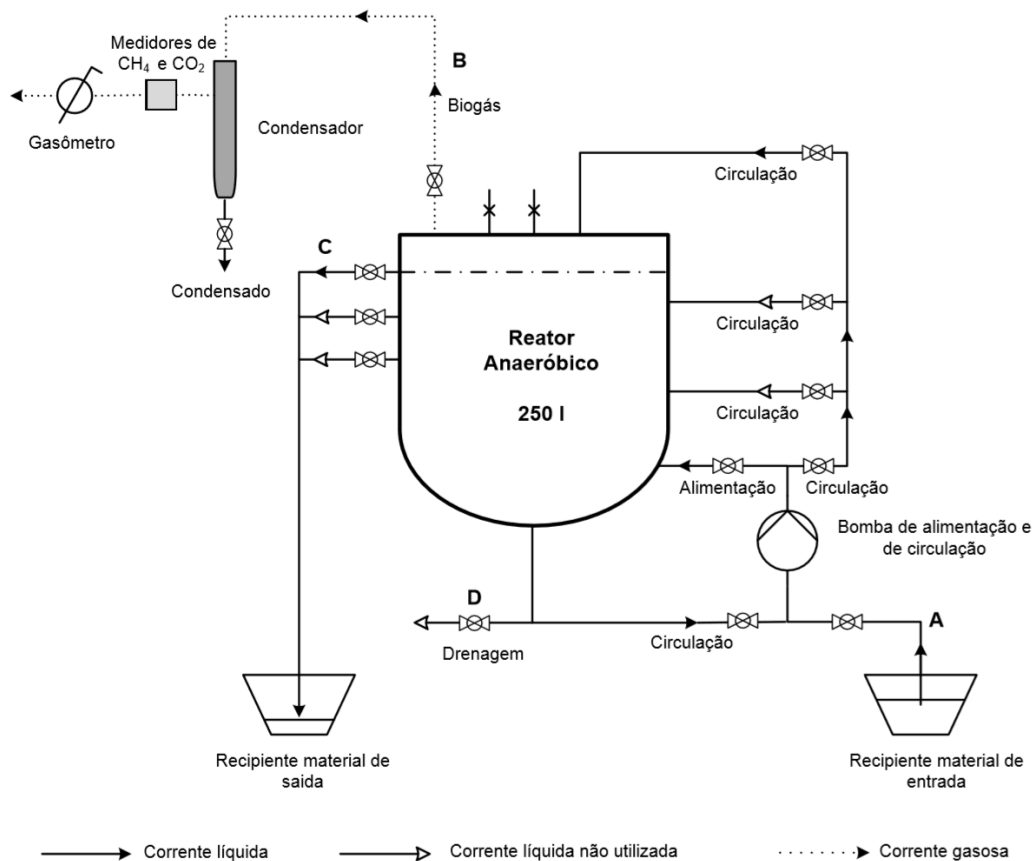


FIGURA 4 - FLUXOGRAMA DA PLANTA PILOTO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Conforme a FIGURA 4, o reator apresentava uma corrente líquida de entrada (A) e três correntes de saída, uma gasosa (B) e duas líquidas (C,D). A corrente de entrada é a corrente na qual era realizada a alimentação da mistura (substrato e co-substrato). A corrente de saída gasosa era composta pelo biogás formado durante o processo de biodigestão e as correntes de saída líquida, uma delas era formada pelo lodo digerido do reator e a outra era uma corrente de drenagem, que não foi utilizada durante os experimentos.

O substrato utilizado foi o lodo digerido produzido pelo reator anaeróbico da estação de tratamento de efluentes mistos (esgoto e industriais) da LFKW da Universidade de Stuttgart em Büsnau, Alemanha. Como co-substrato foi utilizado uma mistura de cereais obtida em uma fazenda próxima a Reutlingen, Alemanha. Amostras do substrato e dos co-substratos testados podem ser observados na FIGURA 5.

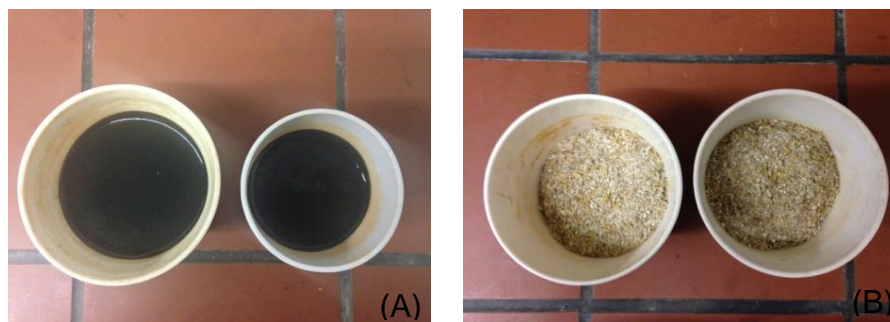


FIGURA 5 - AMOSTRAS UTILIZADAS: (A) SUBSTRATO E (B) CO-SUBSTRATO

Durante os experimentos foram utilizados como co-substratos dois lotes distintos da mistura de cereais, considerados MC-1 e MC-2. A determinação da composição das duas misturas foi realizada nos laboratórios do ISWA. Inicialmente, foram pesadas três amostras de 10 g de cada um dos lotes da mistura de cereais, na sequência as amostras foram separadas manualmente em quatro frações: aveia (A,E), cevada (B,F), trigo (C,G) e impurezas (D,H) e novamente pesadas (FIGURA 6).

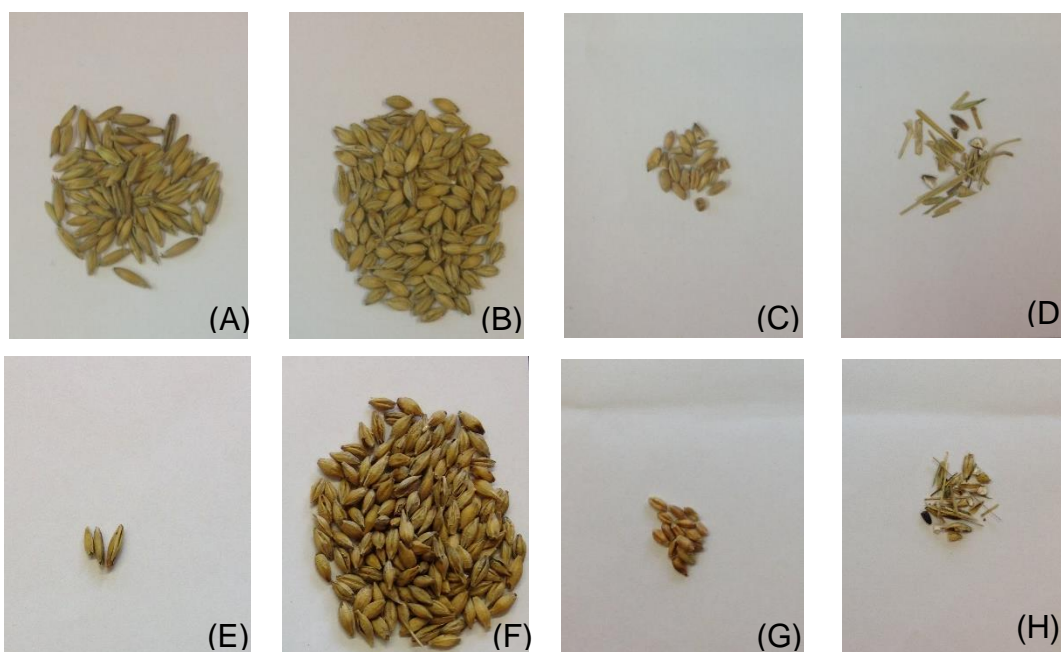


FIGURA 6 - FRAÇÕES DAS MISTURAS DE CEREAIS: (A,E) AVEIA, (B,F) CEVADA, (C,G) TRIGO, (D,H) IMPUREZAS DA MC-1 E DA MC-2

NOTA: As imagens A,B,C e D correspondem a MC-1 e as demais E,F,G e H a MC-2

A composição média encontrada para cada uma das misturas de cereais utilizadas é apresentada na TABELA 1.

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO MÉDIA DAS MISTURAS DE CEREAIS UTILIZADAS

Cereal	MC-1	MC-2
Aveia	30,95%	0,54%
Cevada	61,22%	93,65%
Trigo	5,16%	4,04%
Impurezas	2,68%	1,77%

Para determinar a quantidade de MS e MOS que eram alimentadas no reator foi realizada uma caracterização inicial do lodo digerido (substrato) e das misturas de cereais (co-substratos). Os valores encontrados são apresentados na TABELA 2.

TABELA 2 - CARACTERIZAÇÃO INICIAL DO LODO DIGERIDO E DAS MISTURAS DE CEREAIS

Parâmetros	Lodo digerido	Mistura de cereais	
		MC-1	MC-2
MS (%)	4,45	86,28	91,55
MOS (%)	67,68	76,20	81,53

Os experimentos foram divididos em três partes, realizados de maneira similar para a posterior comparação dos resultados. Entre cada um dos experimentos o reator não foi esvaziado. O TRH do reator foi mantido constante em 62,5 dias. O QUADRO 4 fornece uma visão geral da duração, substratos e co-substratos utilizados e da carga orgânica volumétrica alimentada no reator.

Experimento	Duração (d)	Substrato	Co-substrato	COV (kg _{MOS} /l·d)	Observações
Exp. 1	3	Lodo digerido	MC 1	0,70	Uma alimentação diária
	3			0,94	
	3			1,19	
	3			1,43	
Intervalo 1	4	Período sem alimentação			
Exp. 2	3	Lodo digerido	MC-1	0,70	Uma alimentação diária
	3		MC-1	0,94	
	3		MC-1	1,19	
	3		MC-2	1,50	
Intervalo 2	4	Período sem alimentação			
Exp. 3	3	Lodo digerido	MC-2	0,72	Uma alimentação diária
	3			0,98	
	2			1,24	

QUADRO 4 - VISÃO GERAL DO SUBSTRATO E DOS CO-SUBSTRATOS ALIMENTADOS NO REATOR DURANTE OS EXPERIMENTOS

Durante os finais de semana não foram realizadas alimentações no biodigestor, portanto cada experimento teve uma duração total de 12 dias com

alimentação, mais quatro dias sem alimentação referente aos finais de semana, totalizando 16 dias conforme apresentado no QUADRO 4. Além dos finais de semana, entre um experimento e outro, houveram quatro dias sem alimentação para que não ocorresse a influência do experimento anterior.

4.2 REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Os teores de CH_4 e de CO_2 no gás produzido foram medidos por sensor de infravermelho da empresa *BlueSens Gas Sensor GmbH*. As medições foram realizadas para o CH_4 com medidores do modelo *BCP-CH₄bio* com faixa de operação de 0 - 100 Vol.% de CH_4 e precisão de $<0,2\%$ da escala completa $\pm 3\%$ leitura e para o CO_2 foi utilizado o modelo *BCP-CO₂bio* com faixa de operação de 0 - 50 Vol.% de CO_2 e precisão de $<0,2\%$ da escala completa $\pm 3\%$ leitura.

O volume de gás produzido foi mensurado por um gasômetro, da marca *Ritter Apparatebau GmbH* (modelo *TG 05/5*). Os valores de volume medidos foram corrigidos de acordo com as condições normais de temperatura e pressão (CNTP 273 K e 1,013 bar).

Os dados de composição e de volume medidos foram registrados a cada 10 minutos em dispositivo eletrônico de aquisição de dados (memógrafo) da marca *Endress+Hauser* (modelo *RSG10*). As informações armazenadas, eram diariamente copiadas em um disquete e posteriormente analisadas no software *ReadWin® 2000*. Os valores horários obtidos pelas medições são apresentados no APÊNDICE – DADOS HORÁRIOS BRUTOS.

Os equipamentos e dispositivos utilizados nas medições de gás podem ser observados na FIGURA 7.

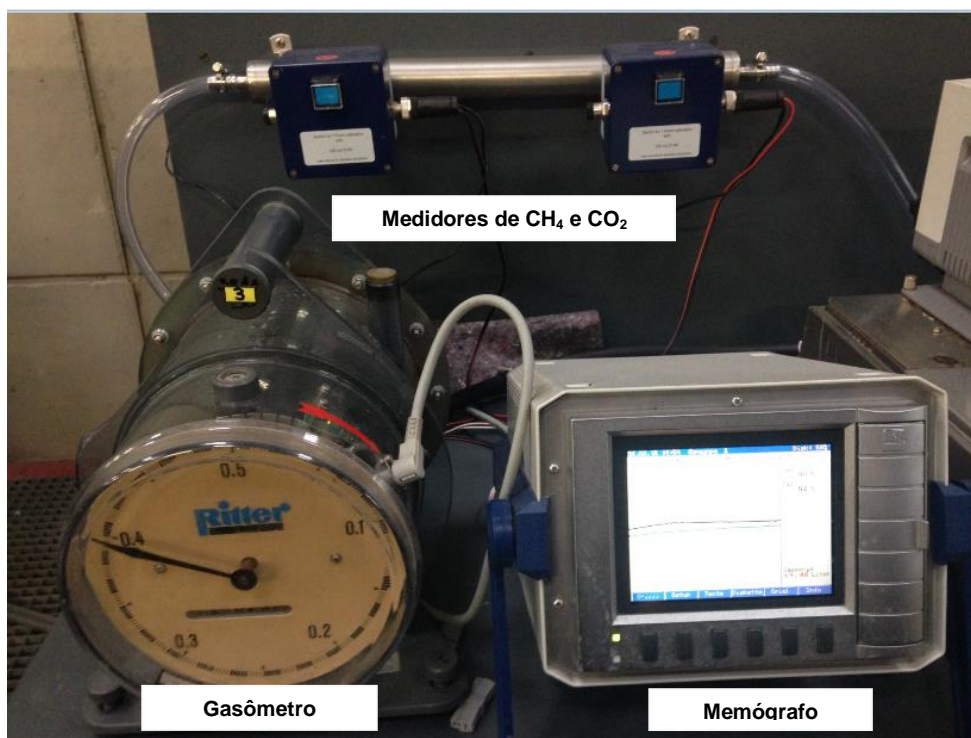


FIGURA 7 - EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NAS MEDIÇÕES DA CORRENTE GASOSA

Os valores de pH e de temperatura da digestão foram medidos com um pH-metro da empresa *Schott Geräte* (modelo *TR 155*) e por um termômetro, respectivamente. Para as medições de pH, amostras do lodo digerido eram coletadas para a realização imediata da análise em laboratório, enquanto as medições de temperatura eram realizadas dentro do biodigestor com o auxílio do sensor do termômetro.

Além da medição do pH, na amostra coletada de lodo digerido eram realizados os testes no laboratório para a determinação do teor de matéria seca, conforme determinado pela norma DIN 38414 S2 e a determinação do teor de matéria orgânica seca, de acordo com a norma DIN 38414 S3. Os valores de MS e MOS obtidos experimentalmente, conforme descrito no item 3.3.5, serviram como base para o cálculo da taxa de degradação do substrato e da carga orgânica volumétrica alimentada no reator.

O esquema do procedimento experimental desenvolvido neste trabalho está representado na FIGURA 8.

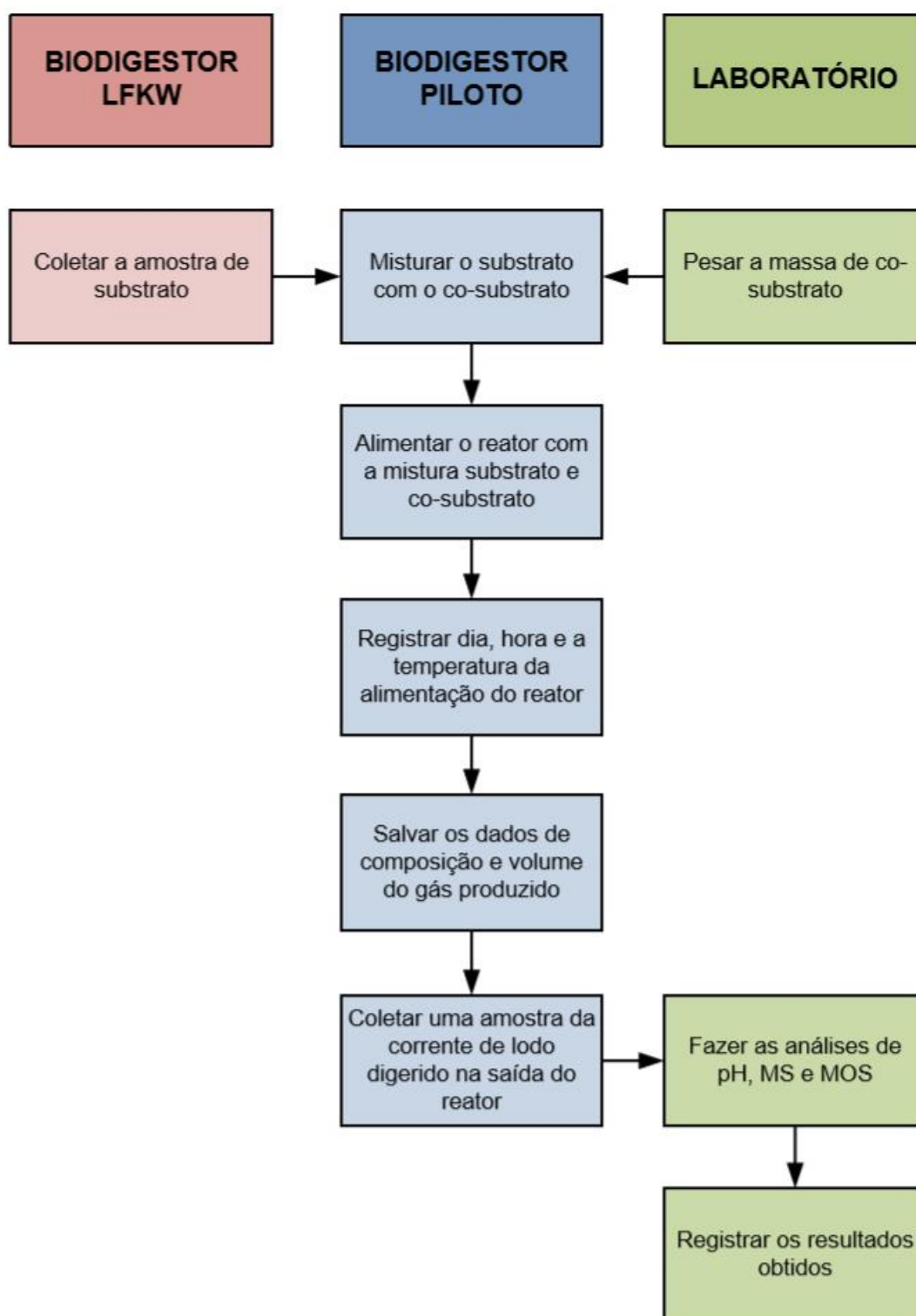


FIGURA 8 – ESQUEMA DO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a realização do procedimento experimental descrito na FIGURA 8, os registros das variáveis de controle eram avaliados diariamente para o

acompanhamento do processo. Os dados relacionados à produção de gás eram armazenados diariamente e avaliados no término de cada experimento.

4.3 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO FLEXÍVEL DE BIOGÁS

A avaliação da flexibilidade do processo de co-digestão do lodo digerido e das misturas de cereais (MC-1 e MC-2) foi realizada para os dias com e sem alimentação do reator. Para os dias com alimentação foram construídos gráficos para cada uma das COVs alimentadas no reator durante 72 h (3 dias). Nos dias sem alimentação do reator durante o Intervalo 1 e o Intervalo 2, verificou-se qual a tendência descrita pela produção de gás.

Finalmente, os dados obtidos foram comparados com os resultados de Schneider (2015). Schneider (2015) fez uso de cargas orgânicas volumétricas entre 1,13 g_{MOS}/(l·d) e 2,17 g_{MOS}/(l·d) para a co-digestão de lodo digerido e de silagem de milho e entre 1,11 g_{MOS}/(l·d) e 2,12 g_{MOS}/(l·d) para a co-digestão de lodo digerido e da mistura de cereais.

A comparação foi realizada entre as cargas orgânicas volumétricas que mais se aproximavam entre os dois trabalhos, conforme o QUADRO 5.

	Schneider (2015)		Schneider (2015)		A autora (2015)	
Co-substrato	Silagem de milho		Mistura de cereais		Mistura de cereais	
Abreviação	M(1,13)	M(1,48)	C(1,11)	C(1,45)	MC(1,19)	MC(1,43)
COV (g _{MOS} /(l·d))	1,13	1,48	1,11	1,45	1,19	1,43

QUADRO 5 - RELAÇÃO ENTRE OS DADOS DE SCHNEIDER (2015) E A AUTORA (2015)

As cargas volumétricas aplicadas tiveram como referência os estudos de Schneider (2015) e as limitações de bombeamento da bomba helicoidal, utilizada para realizar a alimentação do biodigestor.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBICA

Durante os três experimentos foram monitoradas e analisadas as seguintes variáveis de controle: temperatura, pH, MS e MOS. Este controle foi realizado para minimizar oscilações no processo que pudessem influenciar negativamente a atividade microbiana. Os resultados obtidos durante o Exp.1 são apresentados na FIGURA 9.

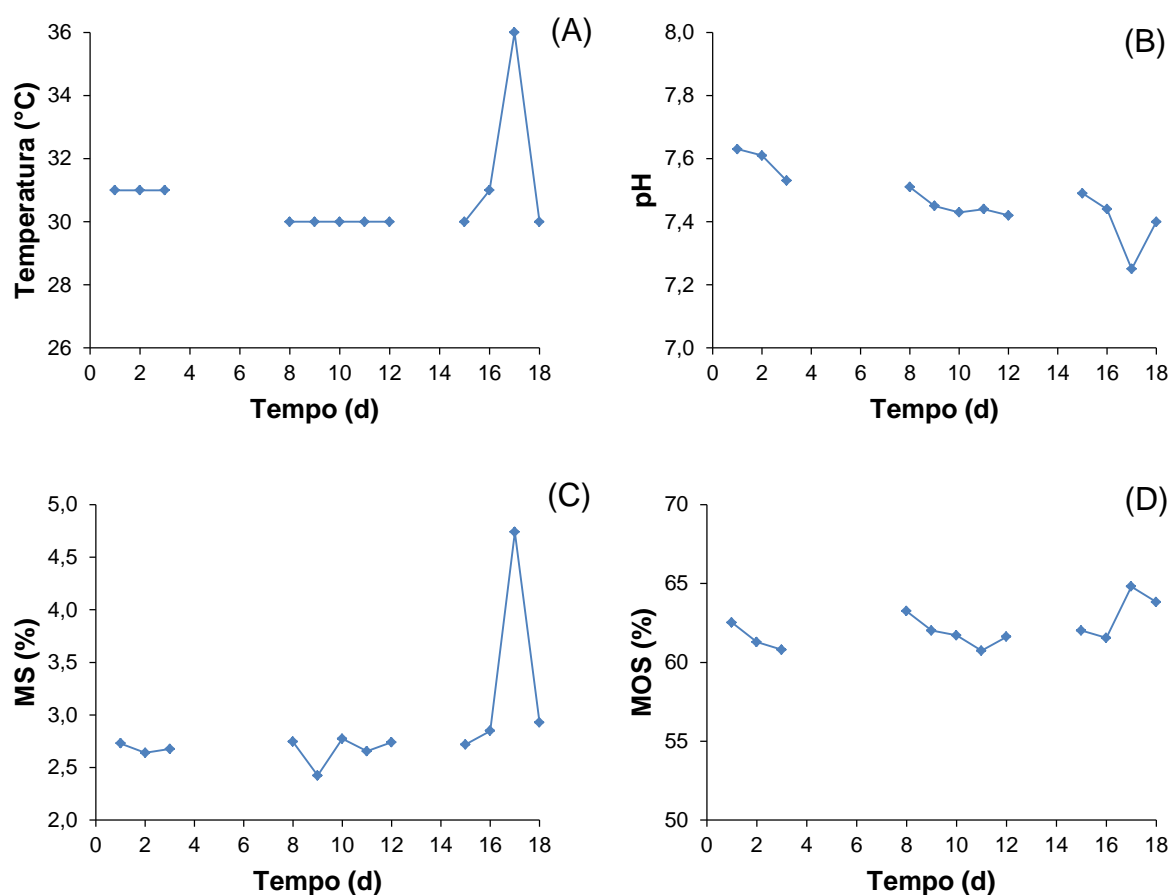


FIGURA 9 - GRÁFICOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE EM FUNÇÃO DO TEMPO DO EXPERIMENTO 1: (A) TEMPERATURA (°C), (B) pH, (C) MS (%) E (D) MOS (%)

As descontinuidades encontradas na sequência de dados dos gráficos da FIGURA 9 representam os dias em que não foram realizadas as medições das

variáveis de controle. Esses dias coincidem com os dias sem alimentação do reator, durante os finais de semana. O mesmo procedimento também foi realizado nos gráficos dos Exp. 2 e 3.

Durante o quarto e o quinto dia do Exp. 1, por motivos técnicos não foi possível realizar a medição da quantidade de gás produzido. O gasômetro, equipamento responsável por tal medição, sofreu uma avaria por queda e teve seu funcionamento regularizado apenas dois dias depois. Por isso, o Exp. 1 teve uma duração total de 18 dias, e não de 16 dias conforme o previsto no QUADRO 4.

Entre o décimo sétimo e o décimo oitavo dia, a temperatura de operação do biodigestor teve um aumento de 5 °C, devido à abertura incompleta da válvula de recirculação. A oscilação da temperatura provocou alterações também no MS e no MOS.

Os valores medidos durante o Exp. 2 são apresentados na FIGURA 10.

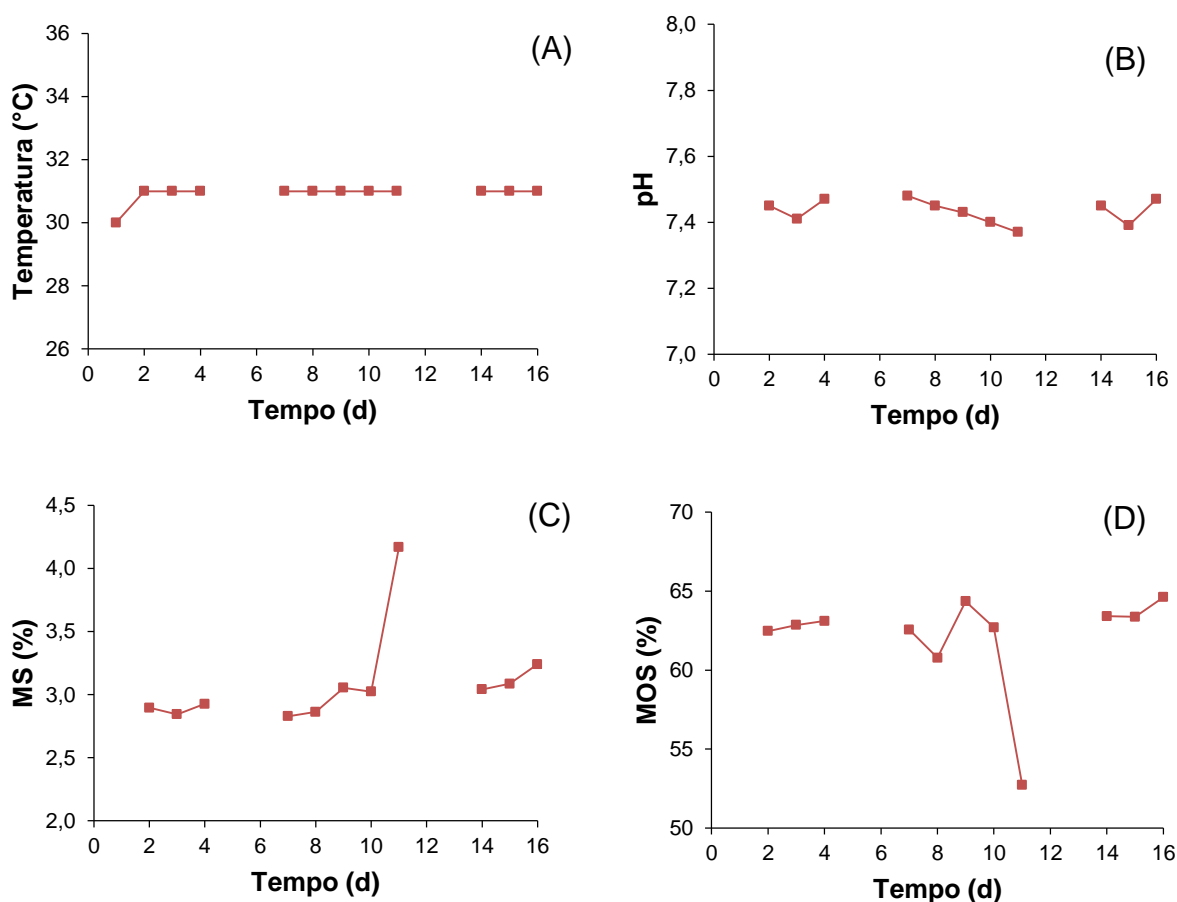


FIGURA 10 - GRÁFICOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE EM FUNÇÃO DO TEMPO DO EXPERIMENTO 2: (A) TEMPERATURA (°C), (B) pH, (C) MS (%) E (D) MOS (%)

Durante o Exp. 2, conforme a FIGURA 10, os valores de temperatura e de pH sofreram apenas pequenas variações, com valores médios de 30,92 °C e 7,43, respectivamente. Todavia, devido à troca de um novo lote de co-substrato, o MC-2, cuja caracterização foi apresentada na TABELA 2 os valores referentes ao MS e ao MOS sofreram alterações no décimo dia do experimento, sendo estabilizados na sequência do experimento.

Os dados obtidos durante o Exp. 3 são apresentados na FIGURA 11.

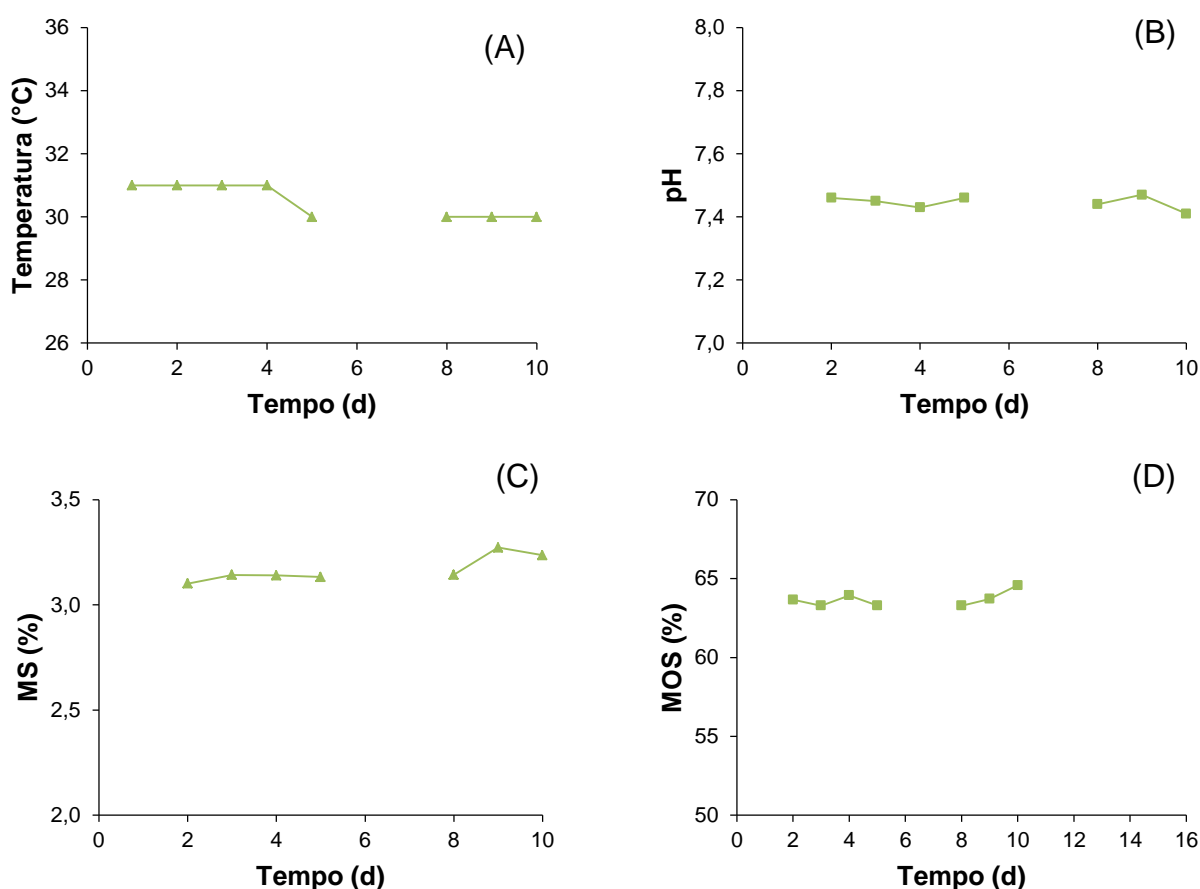


FIGURA 11 - GRÁFICOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE EM FUNÇÃO DO TEMPO DO EXPERIMENTO 3: (A) TEMPERATURA (°C), (B) pH, (C) MS (%) E (D) MOS (%)

Entre os três experimentos o Exp. 3, foi o que apresentou uma maior regularidade entre as variáveis de controle, pois os valores se mantiveram próximos aos valores médios determinados. Os valores médios para os parâmetros acompanhados são apresentados na TABELA 3.

TABELA 3 - VALORES MÉDIOS DAS VARIÁVEIS DE CONTROLE MONITORADAS

Experimento	Temperatura (°C)	pH	MS (%)	MOS (%)
1	30,83	7,47	2,88	62,18
2	30,92	7,43	3,09	62,09
3	30,66	7,44	3,15	63,57
Valores de referência	30 – 40 °C ⁽¹⁾	7 - 8 ⁽²⁾	2,70 – 5,40 ⁽³⁾	60,96 – 64,77 ⁽³⁾

NOTA: ¹ Tortora; Funke; Case (2012), ² Weiland (2010), ³ Schneider (2015)

Os gráficos das FIGURAS 9, 10 e 11, mostram que as condições operacionais se encontram dentro de valores sugeridos por outros pesquisadores, conforme apresentado na TABELA 3. Os valores de MS (%) e de MOS (%) apresentaram variações entre si, pois ocorreu uma mudança do co-substrato utilizado ao longo dos experimentos, conforme apresentado anteriormente no QUADRO 4.

5.1.1 Quantidade do gás produzido

O volume diário de gás produzido durante os experimentos, bem como o início de cada uma das etapas são apresentados na FIGURA 12.

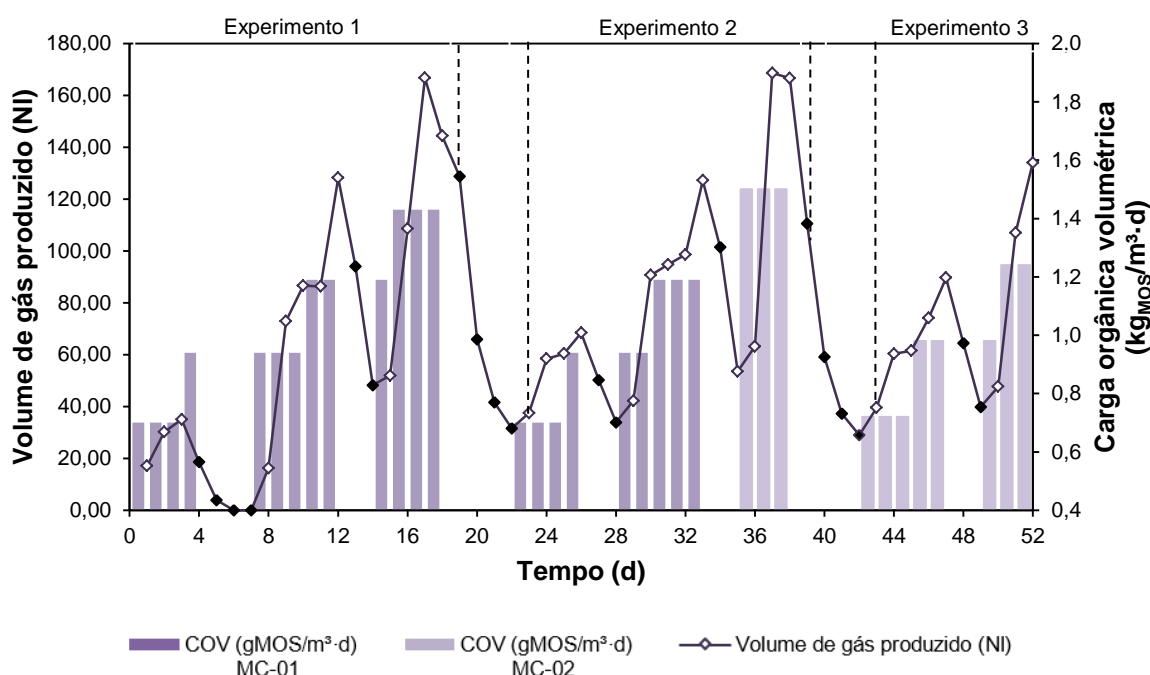


FIGURA 12 - VOLUME DIÁRIO DE GÁS PRODUZIDO DURANTE OS 52 DIAS DE ESTUDO

NOTA: Os pontos pretos assinalados no gráfico simbolizam os dias sem alimentação do reator, que correspondem aos finais de semana e aos intervalos 1 e 2 entre os experimentos

A análise dos resultados mostrados na FIGURA 12 mostrou que mesmo nos dias sem alimentação do reator existe produção de gás, mas seu volume diminui gradativamente até que uma nova alimentação seja realizada. De maneira geral, o volume de gás produzido cresceu no decorrer de cada experimento. Este crescimento coincidiu com o aumento da carga orgânica volumétrica alimentada no reator. Esta afirmação vai ao encontro com os resultados de Owamah; Izinyonou (2015) e de Li *et al.* (2015).

Owamah; Izinyonou (2015) estudaram o efeito das diferentes cargas orgânicas volumétricas no desempenho da co-digestão anaeróbica de resíduos de alimentos e de cascas de milho em um regime contínuo de alimentação. Foram testadas cargas orgânicas volumétricas de 1 a 4,5 g_{MOS}/(l·d) e os volumes de gás produzidos também aumentaram progressivamente. O aumento da COV neste estudo não provocou nenhum efeito inibitório na população microbiana.

Já no estudo de Li *et al.* (2015) foram avaliados os efeitos da matéria-prima e da carga orgânica na co-digestão anaeróbica de palha de arroz e estrume bovino. Nesta pesquisa, as cargas orgânicas volumétricas testadas variaram de 3 a 12 g_{MOS}/(l·d). O crescimento da produção de gás pode ser observado até COVs inferiores a 12 g_{MOS}/(l·d). Acima deste valor o processo de biodigestão foi severamente inibido pelo acúmulo de ácidos graxos voláteis.

5.1.2 Composição do gás produzido

No processo de degradação anaeróbica em questão, o teor de metano foi avaliado em função do tempo de experimento e das diferentes cargas orgânicas volumétricas testadas. Os resultados obtidos em função do tempo constam na FIGURA 13.

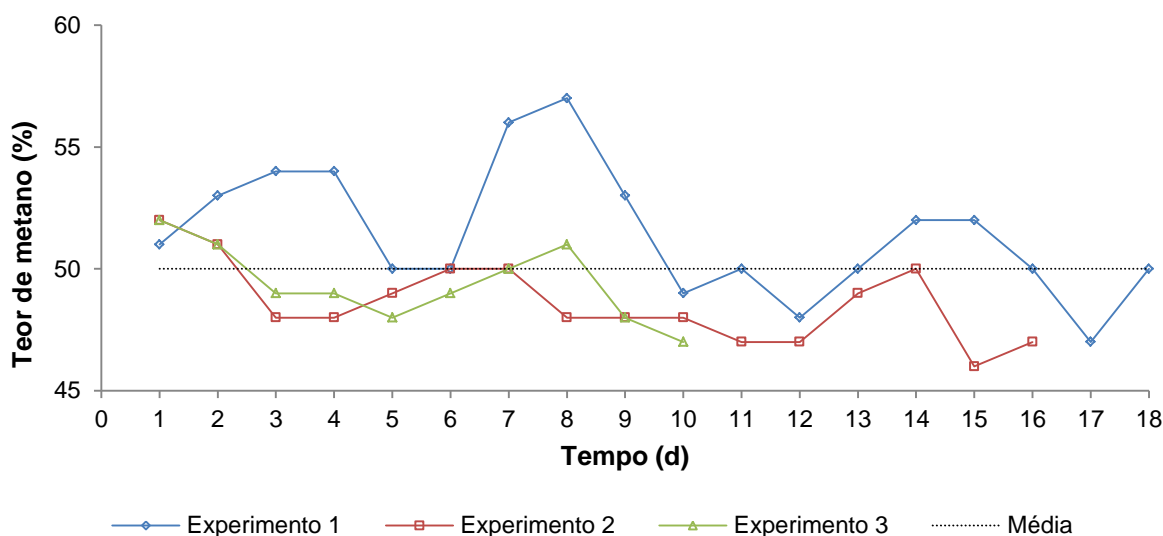


FIGURA 13 - TEOR DE METANO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Conforme resultados mostrados na FIGURA 13, os teores de metano variaram entre 46 – 58%, com valor médio de 50%. De acordo com FNR (2010) o valor médio para o teor de metano para biogás produzido a partir de grãos de cereais é de 53% e segundo SOSNOWOSKI *et al.* (2003) para o lodo de estações de tratamento de esgoto é de 60%. Isto é, os valores obtidos experimentalmente estão de acordo com os valores encontrados pelas referências citadas.

Os teores de metano médios foram avaliados de acordo com a variação da carga volumétrica alimentada no biodigestor, conforme mostra a FIGURA 14.

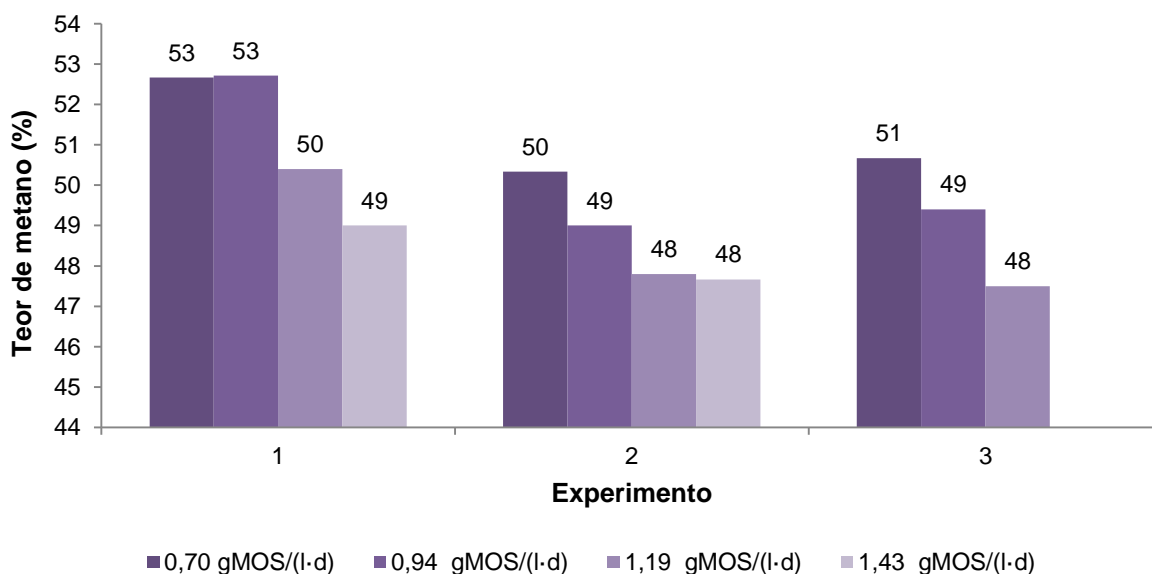


FIGURA 14 - TEOR DE METANO MÉDIO EM FUNÇÃO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA

De acordo com os resultados mostrados na FIGURA 14, o teor de metano médio do gás apresentou a tendência de decaimento com o aumento da carga volumétrica alimentada no reator. Este comportamento também foi constatado por Schneider (2015) em seu estudo de co-digestão de lodo digerido e milho e de lodo digerido e uma mistura de cereais. Neste estudo, o teor médio de gás diminuiu de 64% para uma COV de 1,11 g_{MOS}/(l·d) para 50% em uma COV igual a 2,12 g_{MOS}/(l·d).

Segundo FNR (2010) o aumento da carga volumétrica alimentada de substrato pode reduzir o teor de metano do biogás. Pode-se supor que esse comportamento, esteja diretamente relacionado com a atividade microbiana no interior do biodigestor. O aumento da COV nos reatores anaeróbicos disponibiliza mais nutrientes à microbiota, estendendo a fase de hidrólise e acidogênese, levando a menor produção de metano e ao acúmulo de ácidos, que podem inibir a atividade microbiana.

Ainda de acordo com FNR (2010), a situação oposta também é válida. A redução da COV, pode provocar o aumento do teor de metano do biogás produzido. Isso é um indicativo da degradação dos ácidos graxos acumulados, que tenham se acumulado durante a etapa de acetogênese.

Outra maneira de avaliar a eficiência do processo de degradação anaeróbica é o rendimento de produção do biogás ou de metano. Com base nos valores medidos do volume de gás produzido, teor de metano e massa de substrato alimentada, foi possível calcular os valores para o rendimento de metano. Os dados da TABELA 4 representam os valores calculados para o rendimento de metano para os três experimentos realizados. As unidades dos parâmetros foram ajustadas para se adaptar aos valores encontrados nas demais referências consultadas.

TABELA 4 - CÁLCULO DO RENDIMENTO DE METANO

Experimento	Volume de CH ₄ (Nm ³)	Massa de substrato alimentada (g _{MOS})	Rendimento CH ₄ (Nm ³ /g _{MOS})	Rendimento CH ₄ (Nm ³ /t _{MOS})
1	0,55	2944,96	1,88E-04	188,31
2	0,48	2367,40	2,01E-04	201,39
3	0,51	2512,39	2,02E-04	201,59

De acordo com os dados da TABELA 4, o rendimento de CH₄ no decorrer dos experimentos aumentou gradualmente e apresentou um valor médio entre os experimentos de 197 Nm³/t_{MOS}. Durante seus experimentos, Hamilton (2012) obteve

um rendimento específico de metano para lodo digerido de estações de tratamento de esgoto igual a $0,07 \text{ NI/g}_{\text{MOS}}$ que é equivalente a $70 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{MOS}}$. E, segundo FNR (2010) para grãos de cereais é igual a $389 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{MOS}}$.

Com base nos rendimentos de metano apresentados por Hamilton (2012) e por FNR (2010) e na participação de cada um desses componentes na mistura alimentada no reator, estimou-se um rendimento teórico de biogás igual a $90 \text{ Nm}^3/\text{t}_{\text{MOS}}$. Os valores obtidos neste estudo foram 45% maiores, do que aqueles obtidos por meio de estimativas de cálculo.

A diferença entre os valores encontrados pode ser justificada, pois segundo FNR (2010) os valores teóricos obtidos pelo método de cálculo, devem ser utilizados apenas para verificar tendências e permitir a comparação entre vários substratos. Uma vez que, estas metodologias estimam o rendimento de CH_4 de um substrato ou co-substrato com base apenas em sua composição (carboidratos, proteínas e gorduras), desconsiderando outras variáveis que possam interferir no processo de produção de biogás.

5.1.3 Taxa de degradação do substrato

A taxa de degradação do substrato em relação ao tempo para os três experimentos está apresentada na FIGURA 15.

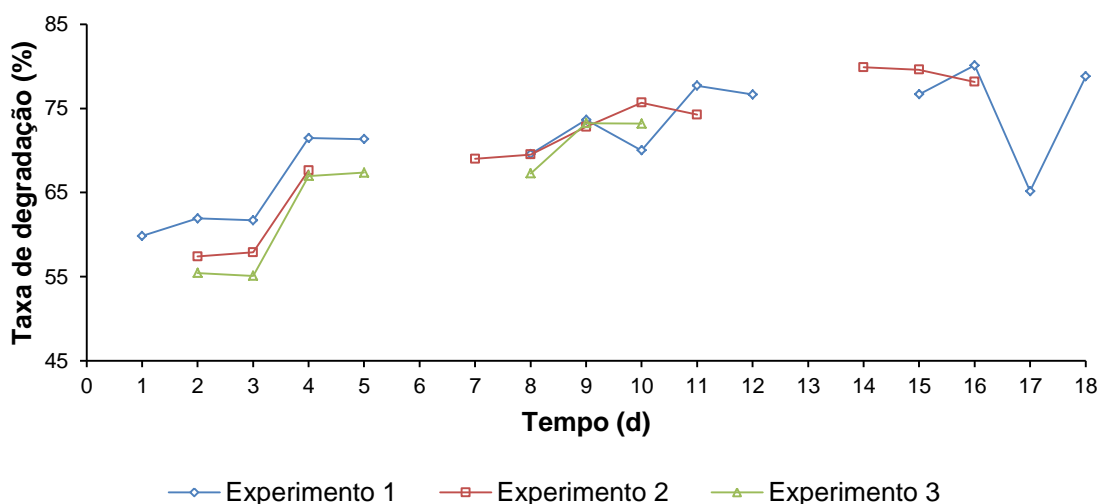


FIGURA 15 - TAXA DE DEGRADAÇÃO EM FUNÇÃO DO TEMPO

Os dados da FIGURA 15 mostram que o crescimento da taxa de degradação do substrato ao longo dos experimentos pode ser observado diariamente. Ao término de cada experimento, foram observadas taxas próximas a 80%. Estes valores poderiam ter sido ainda maiores caso as seguintes alterações não tivessem ocorrido:

- Durante o décimo sétimo dia do Exp. 1, observou-se uma queda de aproximadamente 15% na taxa de degradação do substrato. Esta variação coincide com o dia em que ocorreu um aumento de 5 °C na temperatura no interior do reator. Supõe-se que este aumento repentino de temperatura tenha influenciado na atividade metabólica dos microrganismos inibindo a sua atividade até que as condições de operação fossem normalizadas;
- A taxa de degradação para os primeiros dias dos Experimentos 2 e 3, não pode ser calculada, pois nestes dias não houve saída de lodo digerido do digestor. Portanto, esses pontos não são representados na FIGURA 15.

De acordo, com Appels *et al.* (2011) o tempo necessário para uma degradação eficiente pode variar consideravelmente, com a composição química e a biodegradabilidade do substrato. Conforme FNR (2010) grãos de cereais, independentemente do tipo, apresentam rápida biodegradabilidade quando comparado com outros substratos.

A influência da variação da carga orgânica volumétrica de substrato alimentada no biodigestor na taxa de degradação também foi analisada. Os resultados médios da obtidos no processo devido à variação da carga volumétrica estão na FIGURA 16.

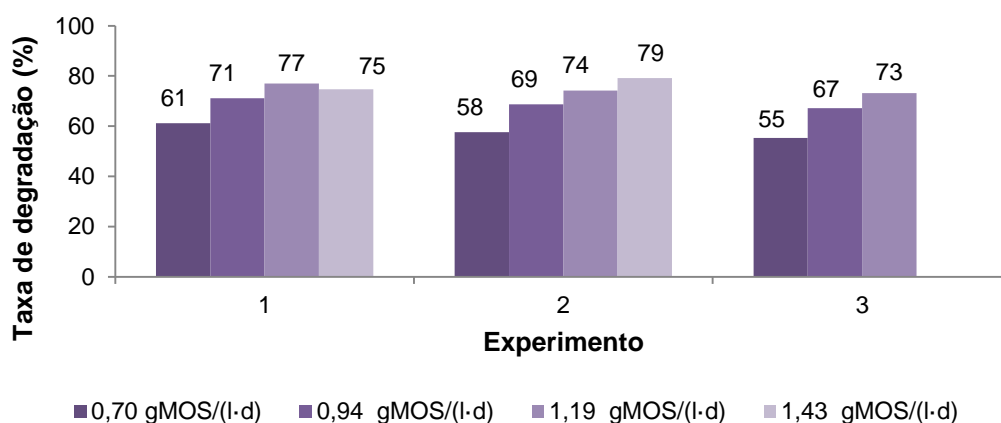


FIGURA 16 - TAXA DE DEGRADAÇÃO MÉDIA EM FUNÇÃO DA CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA ALIMENTADA

A taxa de degradação média de decomposição de matéria orgânica variou entre 55 - 79%, com valor médio de 69%. Os valores encontrados apresentam uma tendência de crescimento, mas segundo Braun *et al.* (2009) a taxa de degradação de sólidos deve ser mantida em valores ainda mais elevados, em torno de 80 a 90% para que o substrato seja utilizado de maneira eficiente.

No levantamento realizado por Ruile *et al.* (2015) em 21 plantas de produção de biogás com diferentes condições operacionais, as taxas de degradação encontradas variaram em torno de $78 \pm 7\%$. As informações coletadas por Ruile *et al.* (2015) mostram ainda que taxas de degradação inadequadas são causadas por baixos tempos de retenção hidráulica. Portanto, uma possibilidade para aumentar as taxas de degradação obtidas nos experimentos realizadas seria aumentar a sua duração.

Ainda de acordo com a FIGURA 16, os experimentos realizados mostram que com o aumento da carga volumétrica alimentada no reator tem-se também um aumento na taxa de degradação do substrato, por exemplo, de 57% para uma carga volumétrica de $0,70 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$ para 79% para uma carga volumétrica de $1,43 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$ no Exp.2.

A tendência observada foi similar à encontrada nos estudos de Schneider (2015), em que a taxa de degradação do substrato testado iniciou com 37% para valores de carga orgânica iguais a $1,11 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$ e alcançou valores em torno de 66% para valores de carga orgânica iguais a $2,12 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$.

5.2 AVALIAÇÃO DA FLEXIBILIDADE DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Em uma produção flexível de biogás é importante estabelecer os tempos necessários para que determinada quantidade de biogás seja produzida ou para que níveis máximos e mínimos de produção sejam atingidos. A FIGURA 17 representa o intervalo de 72 h (3 dias) de produção de biogás com uma carga orgânica volumétrica de $0,70 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$.

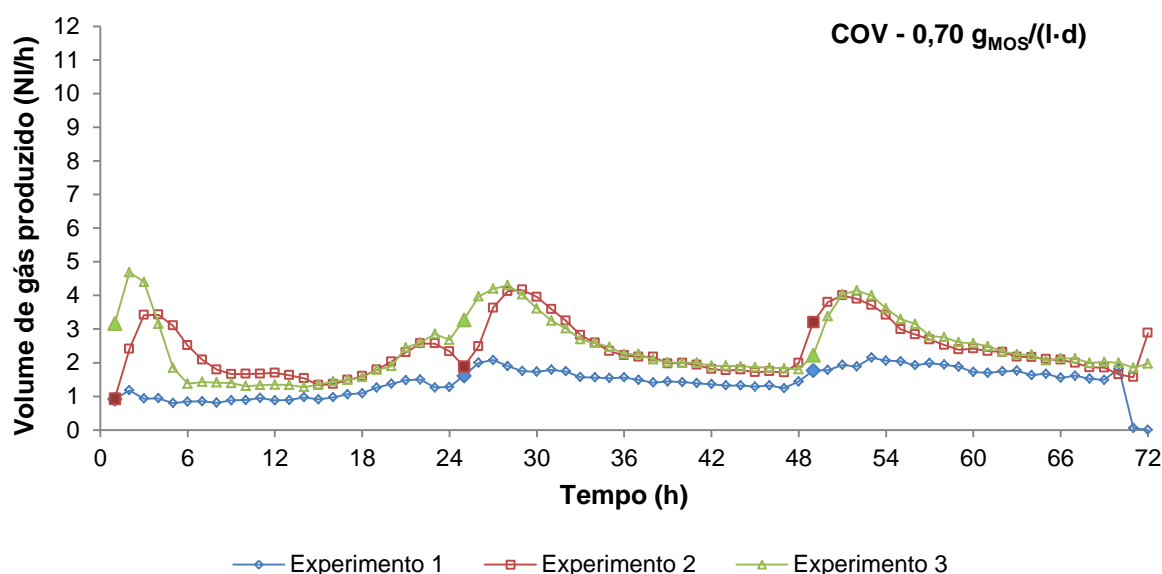


FIGURA 17 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 0,70 g_{MOS}/(l·d)

NOTA: Os pontos preenchidos representam os momentos de alimentação do reator durante o período investigado

Na FIGURA 17 percebe-se que a tendência apresentada pelas curvas da produção de gás para os Exp. 2 e 3 foi bastante próxima. Isto pode ser evidenciado pela pequena diferença na produção de gás, que foi de 171,58 NI para o Exp. 2 e de 176, 65 NI para o Exp.3. Todavia, durante o Exp. 1 o volume de gás produzido foi de apenas 91,42 NI para a mesma carga volumétrica de 0,70 g_{MOS}/(l·d), valor inferior aqueles observados para os demais experimentos.

Antes do início do Exp.1, o biodigestor encontrava-se após um período sem alimentações. Sem alimento, a população bacteriana presente no interior do meio reacional para de se reproduzir e entra em declínio. A redução da quantidade de bactérias provoca, consequentemente, uma diminuição no volume de biogás produzido, até que o número de microrganismos se re-estabeleça.

Segundo KWS MAIS GMBH (2011), as bactérias envolvidas nas quatro etapas do processo de biodigestão anaeróbica metanogênica possuem diferentes tempos de geração, isto é, necessitam de tempos distintos para duplicar a sua população. Weiland (2001) estimou que as bactérias na fase de hidrólise e de acidificação têm um tempo de geração de 24 - 30 h cada, enquanto que, as bactérias metanogênicas possuem um tempo de geração de 12 - 60 h. Sendo assim, a produção de biogás no Exp. 1, só seria equivalente a dos demais experimentos a partir do terceiro dia do experimento.

A FIGURA 18 apresenta a produção horária de gás durante três dias de alimentação com uma carga orgânica volumétrica de $0,94 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$.

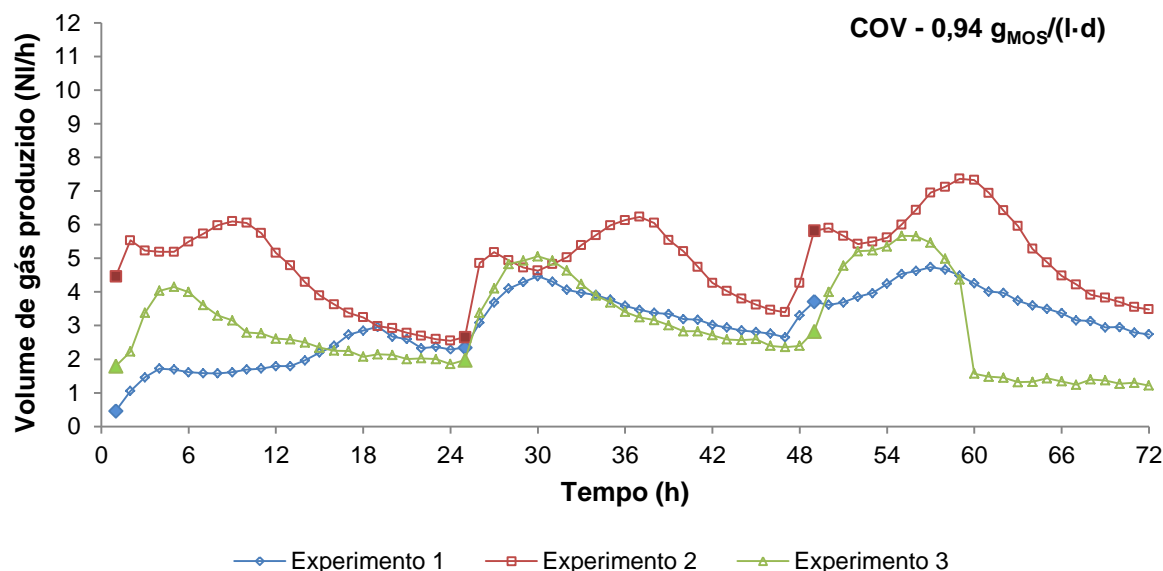


FIGURA 18 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE $0,94 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$

NOTA: Os pontos preenchidos representam os momentos de alimentação do reator durante o período investigado

A produção de gás nos dias de alimentação com COV igual a $0,94 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$ foram superiores aquelas encontradas com COV de $0,70 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$. As produções de gás foram de 219,87 NI no Exp. 1, 352,05 NI no Exp. 2 e de 216,94 NI no Exp. 3. Apesar dos Exp. 1 e do Exp. 3 terem produções de gás equivalentes, não é possível observar uma tendência similar de crescimento do volume de gás produzido entre os resultados. Entretanto, pela avaliação individual de cada experimento é possível observar um perfil de produção de gás que se repete diariamente.

O comportamento apresentado pela produção de gás para as cargas volumétricas de 1,19 e $1,43 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$ é apresentado na FIGURA 19 e na FIGURA 20.

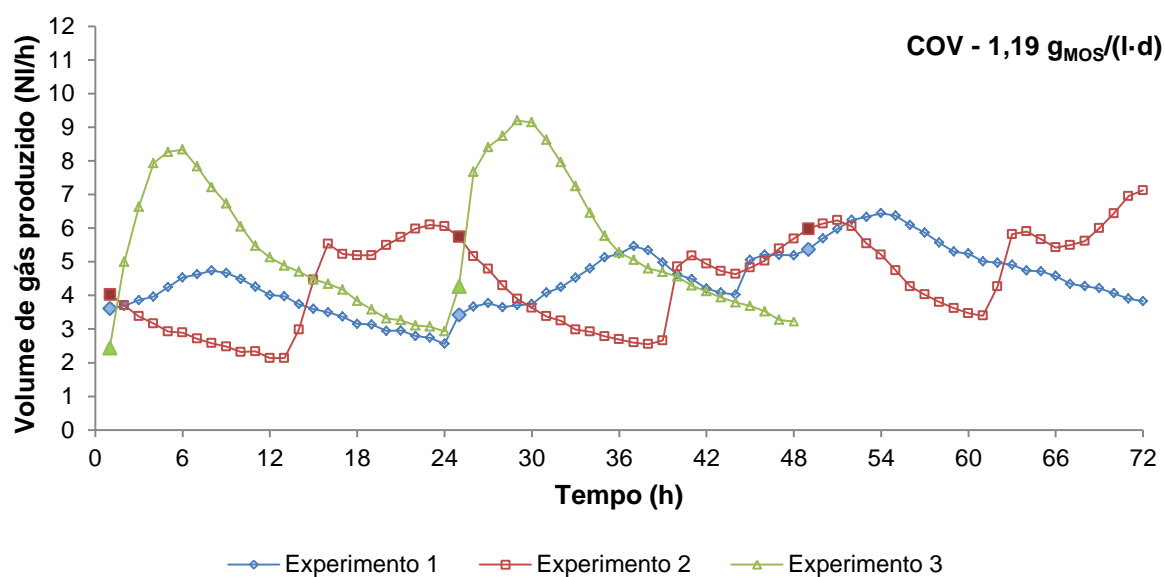


FIGURA 19 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 1,19 g_{MOS}/(l·d)

NOTA: Os pontos preenchidos representam os momentos de alimentação do reator durante o período investigado

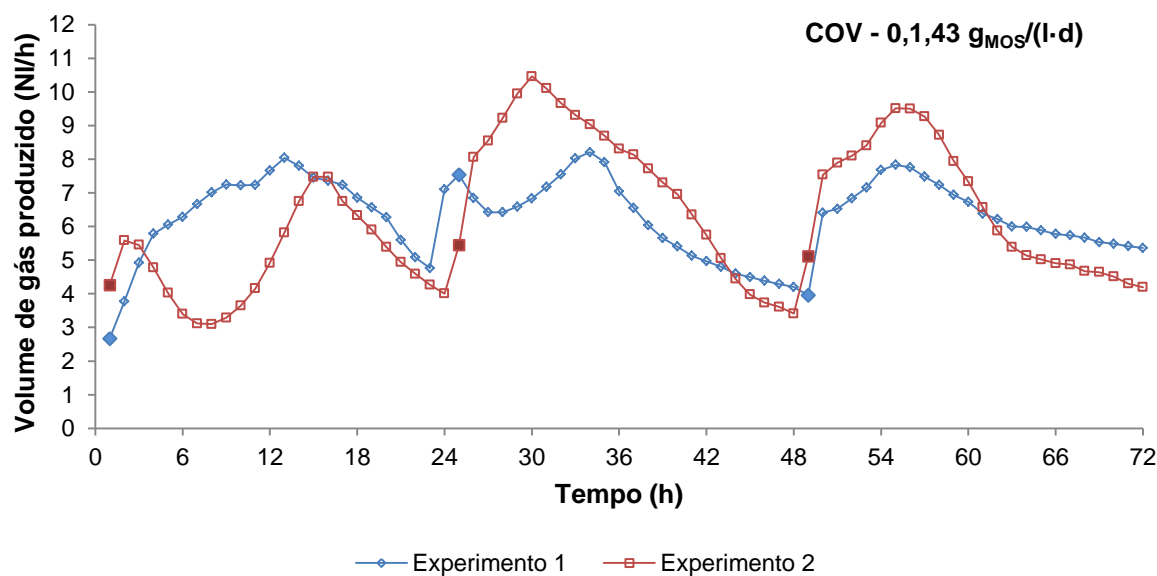


FIGURA 20 - PRODUÇÃO DE GÁS PARA COV DE 0,143 g_{MOS}/(l·d)

NOTA: Os pontos preenchidos representam os momentos de alimentação do reator durante o período investigado

Na FIGURA 19, para a COV de 1,19 g_{MOS}/(l·d), a produção de gás foi de 321,00 NI para o Exp.1, 351,54 NI para o Exp. 2 e 260,40 NI para o Exp.3. Durante o Exp. 3, observaram-se picos de produção de gás com valores máximos de 8,33 NI/h nas primeiras 24 h e de 9,20 NI/h nas 24 h seguintes. Caso este experimento, pudesse ter sido concluído, a produção de gás obtida seria ainda mais significativa.

Já na FIGURA 20, a produção de gás durante os Exp. 1 e 2 foi superior aos valores produzidos com as demais cargas orgânicas volumétricas. De maneira geral, como já discutido anteriormente, os experimentos realizados para todas as COVs mostraram que o aumento da carga volumétrica também proporciona um aumento nos picos de formação de gás.

Finalmente, para determinar dentre as cargas orgânicas volumétricas testadas qual apresenta o maior potencial para serem utilizadas na produção flexível de biogás, um comparativo entre o volume acumulado de gás produzido em função do tempo foi realizado (FIGURA 21).

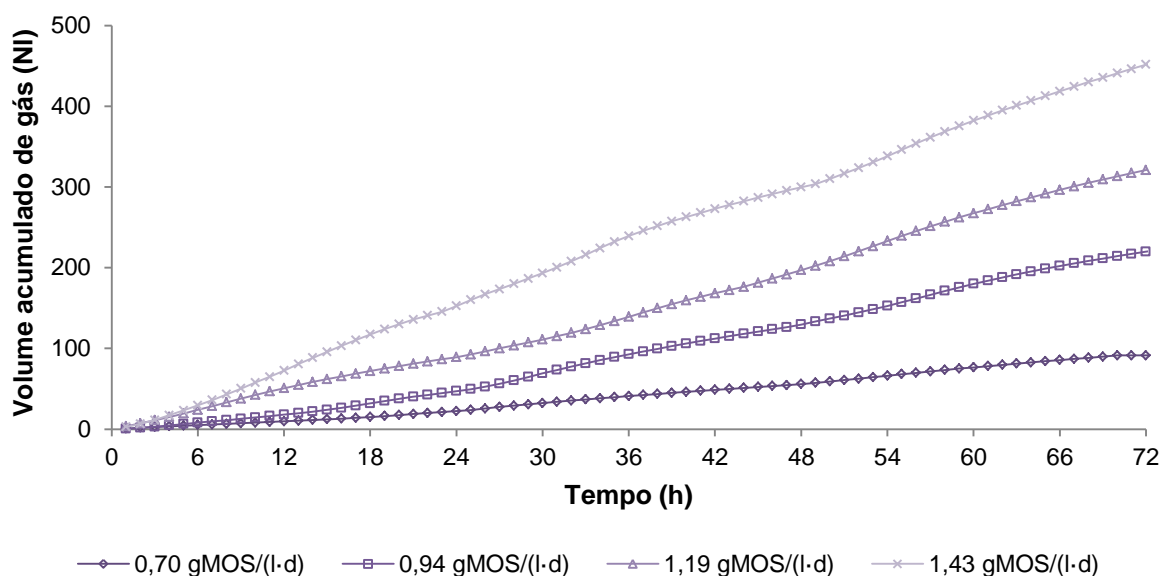


FIGURA 21 - GRÁFICO DO VOLUME ACUMULADO DE GÁS PRODUZIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O EXP. 1

Durante o Exp. 1, conforme a FIGURA 21, o volume acumulado de gás produzido no período de 72 h (3 dias) quando a COV era de 1,43 g_{MOS}/(l·d) foi de aproximadamente 460 NI, bem superior ao volume de 92 NI produzido quando a carga volumétrica foi igual a 0,70 g_{MOS}/(l·d). Entretanto, nas 12 primeiras horas do experimento para as COVs de 0,70 e de 0,94 g_{MOS}/(l·d) e até a oitava hora para 1,19 e 1,43 g_{MOS}/(l·d) a produção de gás foi bastante próxima. Uma análise semelhante foi realizada com os dados do Exp. 2 (FIGURA 22) e do Exp. 3 (FIGURA 23).

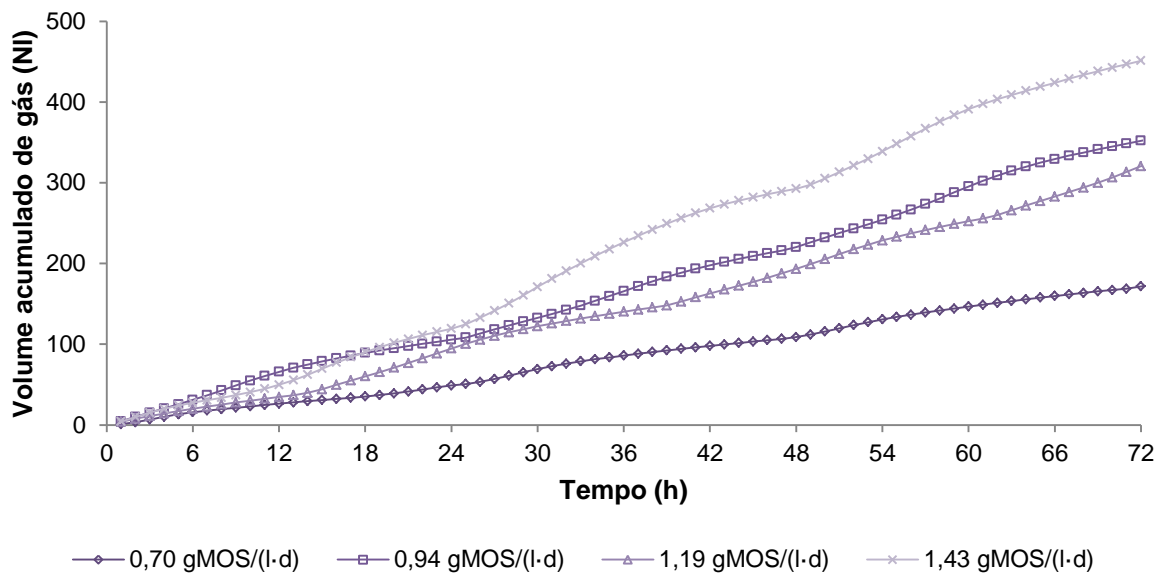


FIGURA 22 - GRÁFICO DO VOLUME ACUMULADO DE GÁS PRODUZIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O EXP. 2

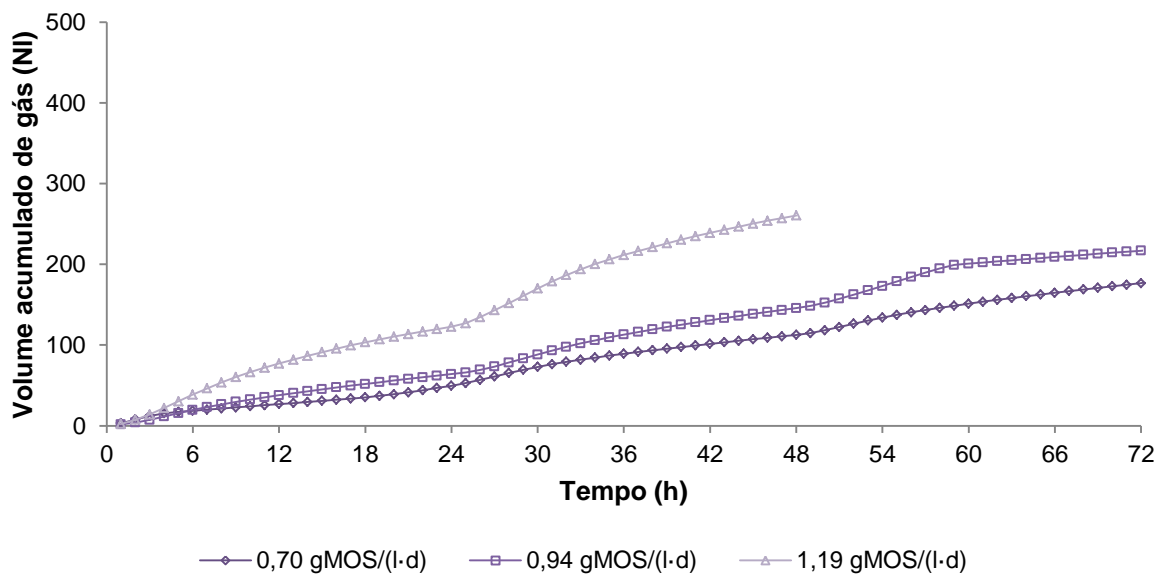


FIGURA 23 - GRÁFICO DO VOLUME ACUMULADO DE GÁS PRODUZIDO EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE O EXP. 3

No Exp. 2 (FIGURA 22), a tendência da produção de gás foi análoga a do Exp.1. Além de apresentarem o mesmo comportamento, a produção de gás também foi equivalente, aproximadamente 460 NI para a COV de 1,43 g_{MOS}/(l·d). Já no Exp. 3 (FIGURA 23), o volume acumulado de gás produzido no período de 72 h apresentou uma produção de gás de 176 NI e de 216 NI para as COVs de 0,70 e de 0,94 g_{MOS}/(l·d), respectivamente.

Os resultados obtidos na avaliação do processo desenvolvido nesta pesquisa foram comparados com os dados de Schneider (2015) em seus estudos de flexibilidade. As abreviações utilizadas nos gráficos de comparação entre os dois estudos foram mostradas no QUADRO 5.

O volume de gás produzido em função do tempo para as amostras com COVs próximas a $1,14 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$ é apresentado no gráfico da FIGURA 24.

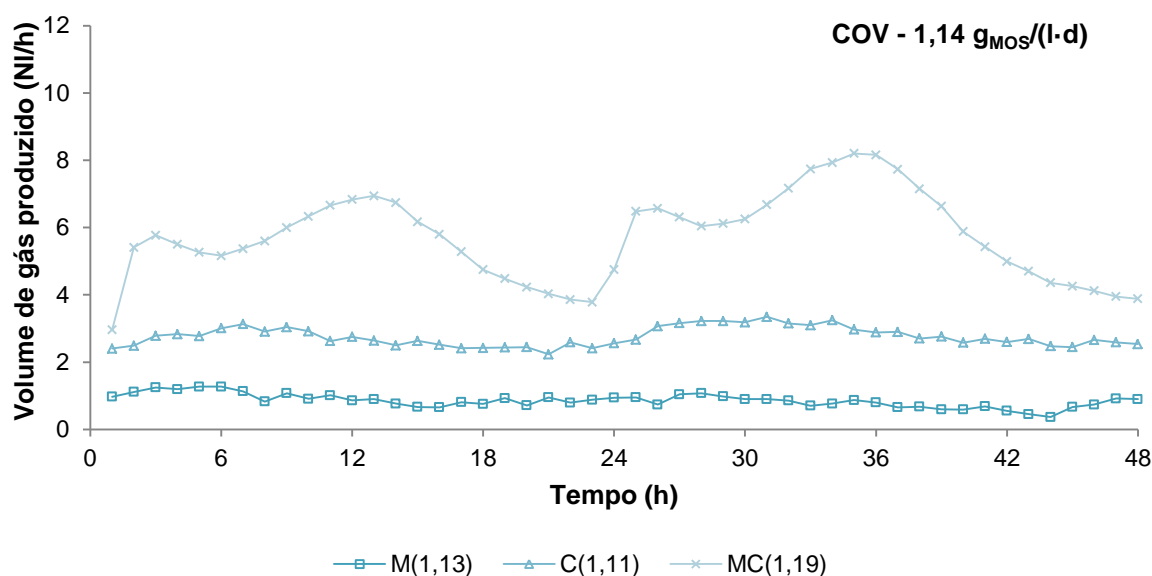


FIGURA 24 - COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE GÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE $1,14 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$

A comparação entre os volumes de produção de gás para os três substratos testados (FIGURA 24), mostrou que os valores obtidos pela silagem de milho foram os menores e que a mistura de cereais proposta por este trabalho apresentou valores superiores aos da mistura de cereais testada por Schneider (2015). Uma análise mais minuciosa dos dados é apresentada na TABELA 5.

TABELA 5 - COMPARATIVO ENTRE OS DADOS DE PRODUÇÃO DE GÁS PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE $1,14 \text{ g}_{\text{MOS}}/(\text{l}\cdot\text{d})$

Parâmetros	M(1,13)	C(1,11)	MC(1,19)
Volume acumulado até a máxima produção (NI)	5,79	19,41	66,27
Tempo até a máxima produção (h)	4	6	12
Taxa de crescimento da produção (NI/h)	1,45	3,24	5,52
Produção máxima – produção mínima (NI/h)	0,61	0,90	2,84
Tempo da produção máxima para a mínima	11	14	10
Taxa de redução da produção (NI/h)	0,06	0,06	0,28

Conforme a TABELA 5, a produção máxima de gás para as amostras M(1,13) e C(1,11) são atingidas entre 8 a 6 h antes do que para a MC(1,19). Porém, a quantidade de gás produzida nesta última amostra é de no mínimo 3,4 vezes maior que as demais.

Na FIGURA 25 pode-se observar o comparativo entre os dados para as amostras com COVs próximas a 1,45 g_{MOS}/(l·d).

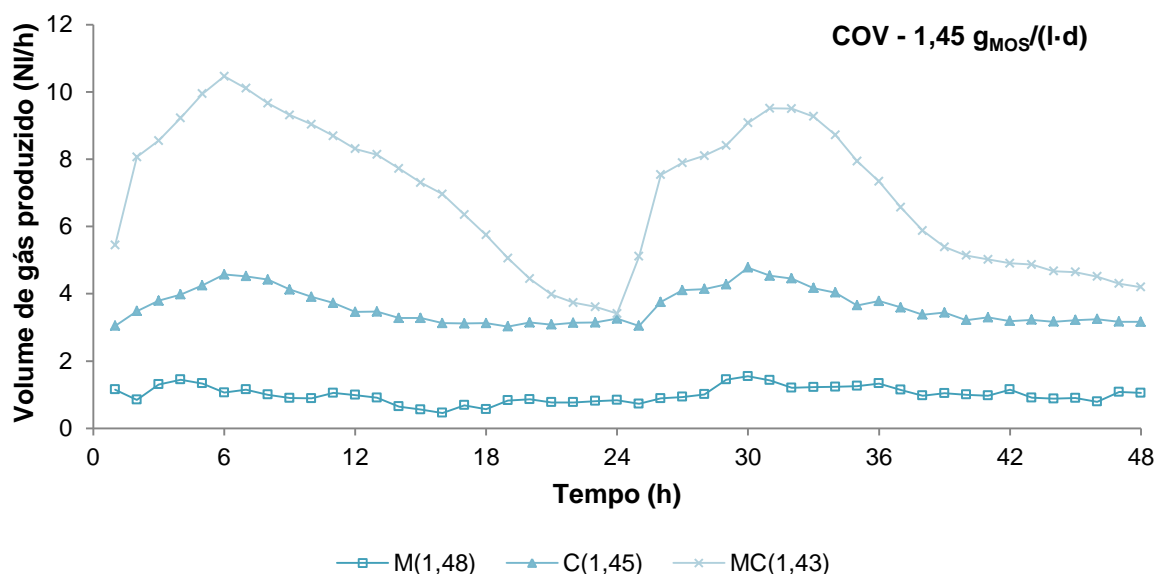


FIGURA 25 - COMPARAÇÃO DA PRODUÇÃO DE GÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE 1,45 g_{MOS}/(l·d)

De maneira análoga a tendência observada na FIGURA 24, os volumes de gás produzidos para a mistura de cereais deste estudo foram superiores aquelas obtidas para a silagem de milho e a mistura de cereais do trabalho de Schneider (2015), para as COVs médias de 1,45 g_{MOS}/(l·d) (FIGURA 25).

A TABELA 6 apresenta o comparativo dos dados de produção de gás para as amostras com COVs próximas a 1,45 g_{MOS}/(l·d).

TABELA 6 - COMPARATIVO ENTRE OS DADOS DE PRODUÇÃO DE GÁS PARA AS AMOSTRAS COM COV MÉDIA DE 1,45 g_{MOS}/(l·d)

Parâmetros	M(1,48)	C(1,45)	MC(1,43)
Volume acumulado até a máxima produção (NI)	4,74	23,12	51,68
Tempo até a máxima produção (h)	3	5	5
Taxa de crescimento da produção (NI/h)	1,58	4,62	10,34
Produção máxima – produção mínima (NI/h)	0,99	1,43	7,05
Tempo da produção máxima para a mínima	12	13	18
Taxa de redução da produção (NI/h)	0,08	0,11	0,39

Com o aumento da carga orgânica volumétrica alimentada no reator a produção máxima atingiu valores maiores, mais rapidamente. A principal alteração foi observada para a amostra MC(1,43) que teve sua máxima produção em apenas 5 h após a alimentação, quanto que a MC(1,19) teve seu ápice em 10 h.

Em alguns estudos como no de Bauer (2013) e no de Mauky *et al.* (2015), a máxima produção de gás foi obtida em menores intervalos de tempo, de 30 a 80 min. De maneira similar nesses estudos a produção mínima de gás também é obtida mais rapidamente, em questão de 2 h. Em ambos os casos, os substratos e os co-substratos utilizados eram misturas mais facilmente biodigeridos como lodo primário, resíduos alimentares, beterraba sacarina, entre outros.

Na busca da produção de biogás flexível e orientada com a demanda, algumas variáveis devem ser consideradas, entre elas: o tempo necessário para que a produção máxima e mínima de gás seja atingida, o volume máximo e mínimo de gás produzido e a estabilidade geral do processo. Todavia, por ser tratar de um assunto recente os estudos de flexibilidade e de produção orientada com a demanda ainda carecem da criação de critérios e valores de referência a serem seguidos para a flexibilidade.

Devido às limitações citadas considerou-se que a flexibilidade do processo foi atingida pela COV que apresentou maiores volumes de produção de gás no menor intervalo de tempo após a alimentação. Neste sentido, a produção flexível foi obtida pela COV de 1,43 g_{MOS}/(l·d). Além disso, os resultados obtidos na comparação dos co-substratos utilizados sugerem que as misturas de cereais testadas neste trabalho possuem um maior potencial para atender a uma produção flexível e orientada com a demanda do que os co-substratos utilizados por Schneider (2015). Supõe-se que esses resultados sejam reflexos da maior facilidade dos microrganismos degradar a mistura de cereais (MC).

5.2.1 AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE GÁS NOS DIAS SEM ALIMENTAÇÃO DO REATOR

Para que os níveis de produção de gás retornassem para valores mínimos, entre o término de um experimento e o início do próximo, foram adotados intervalos

de quatro dias. Durante esse período não foram realizadas novas alimentações, sendo possível assim avaliar a maneira com que a produção de gás foi reduzida.

O decaimento da produção de gás durante os intervalos 1 e 2 estão representados na FIGURA 26.

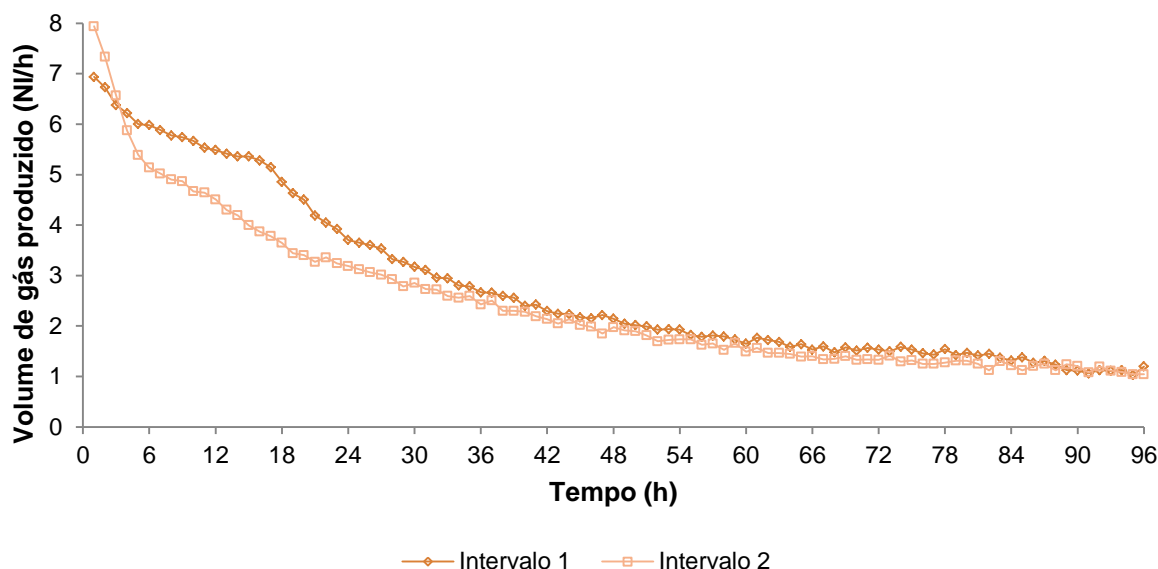


FIGURA 26 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM FUNÇÃO DO TEMPO DURANTE OS INTERVALOS SEM ALIMENTAÇÃO DO REATOR

Conforme analisado na FIGURA 26, a redução da produção de gás durante os dois intervalos pode ser descrita por uma curva logarítmica. Supõe-se que devido à diminuição da disponibilidade de alimentos, as bactérias no meio reacional tenham morrido, e que por isso o volume de gás produzido tenha reduzido também.

Com os dados levantados durante os dias sem alimentação do reator, também foi possível estimar uma taxa de decaimento da produção de gás durante os dois intervalos estudados (TABELA 7).

TABELA 7 - DECRÉSCIMO DA PRODUÇÃO DE GÁS DURANTE OS INTERVALOS 1 E 2

Dia sem alimentação (d)	Intervalo 1				Intervalo 2			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Volume inicial produzido (NI/h)	6,94	3,65	2,05	1,50	7,94	3,13	1,91	1,41
Volume final produzido (NI/h)	3,70	2,14	1,53	1,20	3,19	1,98	1,33	1,04
Volume final produzido – volume inicial produzido (NI/h)	3,24	1,51	0,52	0,30	4,75	1,15	0,58	0,37
Redução média de volume por hora (NI/h)	0,14	0,07	0,02	0,01	0,21	0,05	0,03	0,02

De acordo com a TABELA 7, a redução média do volume de gás produzido por hora durante o Intervalo 2 é maior do que no Intervalo 1. Todavia, observa-se também que a produção inicial de gás durante o Intervalo 2 também é maior. De qualquer maneira, nos dois casos a quantidade de gás reduz mais lentamente com a redução do volume de gás produzido.

6 CONCLUSÃO

A avaliação da influência da alimentação no processo de co-digestão de lodo digerido e de uma mistura de cereais mostrou que foi possível obter uma produção flexível de biogás. De maneira geral, os resultados mostraram que a geração de gás foi fortemente influenciada pelas cargas orgânicas volumétricas empregadas.

A produção de gás cresceu continuamente com o incremento da carga volumétrica alimentada. Todavia, esse aumento provocou alterações na qualidade do biogás, com a redução do teor de metano de 58% para até 46%. O rendimento de metano na mistura gasosa produzida variou de 142,53 Nm³/t_{MOS} a 161,78 Nm³/t_{MOS}.

A taxa de degradação do substrato alimentado no reator foi inferior às mencionadas na literatura, apresentando um valor médio de 69%. Maiores valores da taxa de degradação, em torno de 79%, puderam ser observados durante os últimos dias de cada experimento (após 12 dias).

A avaliação da flexibilidade do processo foi focada principalmente no volume de gás produzido durante os experimentos. Não foi possível observar uma tendência similar de crescimento do volume de biogás entre os experimentos. Entretanto, foi possível observar um perfil de produção de gás que se repete a cada alimentação. Verificou-se também que a taxa de decaimento de produção de biogás tem uma tendência logarítmica em 96 h sem alimentação.

A comparação dos resultados obtidos com os de um estudo similar, mostra que mistura utilizada para a co-digestão nesse trabalho apresenta um maior potencial para a produção flexível. Isto por que a mistura de cereais utilizada é mais facilmente assimilada pelos microrganismos, ocasionando uma maior produção de gás durante períodos mais longos de tempo.

Sugere-se que novos estudos sejam realizados englobando novos substratos e novos regimes de alimentação do reator, para que diferentes soluções possam ser utilizadas na produção de biogás flexível e orientada de acordo com a demanda.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALEMANHA. BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE (BWMi). **Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG 2014) (versão em língua alemã)**. Disponível em: <<http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/erneuerbare-energien.html>>. Acesso em: 02/01/2015.

AMON, T.; AMON, B.; KRYVORUCHKO, V.; MACHMÜLLER, A.; HOPFNER-SIXT, K.; BODIROZA, V.; HRBEK, R.; FRIEDEL, J.; PÖTSCH, E.; WAGENTRISTL, H.; SCHREINER, M.; ZOLLITSCH, W. **Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations**. Bioresource Technology, n° 98, p. 3204–3212, 2007.

APPELS, L.; BAEYENS, J.; DEGREVE, J.; DEWIL, R. **Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge**. Progress in Energy and Combustion Science, n° 34, p. 755–781, 2008.

APPELS, L.; LAUWERS, J.; DEGRÈVE, J.; HELSEN, L.; LIEVENS, B.; WILLEMS, K.; VAN IMPE, J.; DEWIL, R. **Anaerobic digestion in global bio-energy production: Potential and research challenges**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n°15, p. 4295– 4301, 2011.

BASERGA, U. **Landwirtschaftliche Co-Vergärungs-Biogasanlagen**. FAT-Berichte, n° 512, p. 1-11, 1998.

BAUER, P. **Versuche und Grundlagen zur diskontinuierlichen Beschickung von anaeroben Faulanlagen**. 110 p. Monografia (Graduação em Engenharia) - Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Stuttgart Universität, Stuttgart, 2013.

BLAZEJCZAK, J.; BRAUN, F. G.; EDLER, D.; SCHILL, W.P. **Economic effects of renewable energy expansion: A model-based analysis for Germany**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n° 40, p. 1070–1080, 2014.

BRAUN, R. **Improvement of crop plants for industrial end uses**. In: RANALLI, P. (ed.). Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development. Dordrecht: Springer, 2007. p. 335–415.

BRAUN, R.; WEILAND, P.; WELLINGER, A. **Biogas from Energy Crop Digestion**. IEA Bioenergy, n°37, p. 1-20, 2009.

BUNDESVERBAND DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN BERUFSGENOSSEN SCHAFTEN. **Technische Information 4 – Sicherheitsregeln für Biogasanlagen**. Kassel, 2008. Disponível em: < http://www.praevention.lsv.de/lbg/fachinfo/info_ges/ti_4/titel.htm>. Acesso em 14/04/2015.

CHEN, F.; LU, S.; WANG, E.; TSENG, K. **Renewable energy in Taiwan**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n° 14, p. 2029–2038, 2010.

CUI, Z.; SHI, J.; LI, Y. **Solid-state anaerobic digestion of spent wheat straw from horse stall**. Bioresource Technology, n° 102, p. 9432–9437, 2011.

DEUBLEIN, D. (Ed); STEINJAUSER, A (Ed). **Biogas from Waste and Renewable Resources - An Introduction**. Weinheim: Wiley-VCH, 2008. 450 p.

DIEKMANN, B.; ROSENTHAL, E. **Energie - Physikalische Grundlagen ihrer Erzeugung, Umwandlung und Nutzung**. 3. ed. Wiesbaden: Springer, 2014. 514 p.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Wassergehaltes und des Trockenrückstandes bzw. der Trockensubstanz (S 2)** (DIN 38 414 – Teil 2), 1985.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN). **Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung - Schlamm und Sedimente (Gruppe S) - Bestimmung des Glührückstandes und des Glühverlustes der Trockenmasse eines Schlammes (S 3)** (DIN 38 414 – Teil 3), 1985.

EHRLICH, R. **Renewable Energy – A First Course**. Boca Raton: CRC Press, 2013. 464 p.

FACHAGENTUR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR). **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. 5 ed. Gülzow: FNR, 2010. 236 p.

FERREIRA, L.C.; NILSEN, P.J.; FDZ-POLANCO, F.; PÉREZ-ELVIRA, S.I. **Biomethane potential of wheat straw: Influence of particle size, water impregnation and thermal hydrolysis**. Chemical Engineering Journal, n° 242 p. 254–259, 2014.

GERARDI, M.H. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. Nova Jersey: John Wiley & Sons, 2003. 188 p.

GERHARDT, N. **Technische potenziale einer variablen Stromeinspeisung durch Biogasanlagen**. 2009. Disponível em: <http://renknownet2.iwes.fraunhofer.de/pages/bio_energy/data/technische_Potenziale_BGA_variable_Stromeinspeisung.pdf>. Acesso em: 23/03/2015.

GOLKOWSKA, K.; SIBISI-BEIERLEIN, N.; GREGER, M. **Kinetic Considerations on Thermophilic Digestion of Maize Silage at Different Feeding Modes**. Chemie Ingenieur Technik, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, ano 84, n° 9, p. 1551–1558, 2012.

HAHN, H.; KREMER, B. K.; HARTMANN, K.; WACHENDORF, M. **Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n°29, p. 383–393, 2014.

HAMILTON, D.W. **Anaerobic Digestion of Animal Manures: Methane Production Potential of Waste Materials**. Oklahoma Cooperative Extension Service, 2012. Disponível em: <<http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-8544/BAE-1762web.pdf>>. Acesso em: 21/04/2015.

HENDRIKS, A.T.W.M.; ZEEMAN, G. **Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass**. Bioresource Technology, n° 100, p. 10–18, 2009.

HINSCH, A., HOLZAPFEL, N. **§ 21 Direktvermarktung von Strom aus erneuerbaren Energien**. In: LOIBL, H.*et al.* (ed.). Biogasanlagen im EEG. Berlin: Verlag, 2013. p.523.

HORST, D.J.; DIHL, W.; FRANCISCO, A.C. **Technological forecasting: renewable energies generation in Brazil**. Espacios, n° 5, vol. 34, p.4-15, 2013.

KALTSCHMITT, M.; HARTMANN, H. **Energie aus Biomasse – Grundlagen, Techniken und Verfahren**. Berlin: Springer Verlag, 2001. 150 p.

KRISCHANIA, M.; VIJAY, V.K.; CHANDRA, R. **Methane fermentation and kinetics of wheat straw pretreated substrates co-digested with cattle manure in batch assay**. Energy, n° 57, p. 359-367, 2013.

KWS MAIS GMBH. **Biogas Grundlagen der Gärbiologie**. (2011). Disponível em: < https://www.kws.de/global/show_document.asp%3Fid%3Daaaaaaaaaantyr%26download%3D1+%&cd=2&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 14/06/2015.

LI, D.; LIU, S.; MI, L.; LI, Z.; YUAN, Y.; YAN, Z.; LIU, X. **Effects of feedstock ratio and organic loading rate on the anaerobic mesophilic co-digestion of rice straw and cow manure**. *Bioresource Technology*, n° 189, p. 319–326, 2015.

LUND, H.; ANDERSEN, A.N.; ØSTERGAARD, P.A.; VAD MATHIESEN, B.; CONNOLLY, D. **From electricity smart grids to smart energy systems - A market operation based approach and understanding**. *Energy*, n° 42, p.96-102, 2012.

LV, W.; SCHANBACHER, F.L.; YU, Z. **Putting microbes to work in sequence: Recent advances in temperature-phased anaerobic digestion processes**. *Bioresource Technology*, n° 101, p. 9409–9414, 2010.

LV, Z.; LEITE, A.F.; HARMS, H.; RICHNOW, H.H.; LIEBETRAU J.; NIKOLAUSZ, M. **Influences of the substrate feeding regime on methanogenic activity in biogas reactors approached by molecular and stable isotope methods**. *Anaerobe*, n° 29, p. 91-99, 2014.

MAUKY, E.; JACOBI, H. F.; LIEBETRAU, J.; NELLES, M. **Flexible biogas production for demand-driven energy supply – Feeding strategies and types of substrates**. *Bioresource Technology*, n° 178, p. 262-269, 2015.

MC KINNEY, R.E. **Environmental Pollution Control Microbiology**. Nova York: Marcel Dekker, 2004. 453 p.

MUSSOLINE, W.; ESPOSITO, G.; LENS, P.; SPAGNI, A.; GIORDANO, A. **Enhanced methane production from rice straw co-digested with anaerobic sludge from pulp and paper mill treatment process**. *Bioresource Technology*, n° 148, p.135–143 (2013).

NEUEFFER, D. **Anaerobe Co-Fermentation von Konzentraten aus der Textilveredlungsindustrie**. 214 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften, Stuttgart Universität, Stuttgart, 2004.

OWAMAH, H.I.; IZINYON, O.C. **The effect of organic loading rates (OLRs) on the performances of food wastes and maize husks anaerobic co-digestion in continuous mode**. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, n° 11, p. 71–76, 2015.

PEREIRA, M. G.; CAMACHO, C. F.; FREITAS, M. A. V.; SILVA, N. F.. **The renewable energy market in Brazil: Current status and potential**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, nº 16, p. 3786– 3802, 2012.

POHL, M.; HEEG, K.; MUMME, J. **Anaerobic digestion of wheat straw – Performance of continuous solid-state digestion**. Bioresource Technology, nº 146, p. 408–415, 2013.

RUILE, S.; SCHMITZ, S.; MÖNCH-TEGEDER, M.; OECHSNER, H. **Degradation efficiency of agricultural biogas plants – A full-scale study**. Bioresource Technology, nº 178, p. 341–349, 2015.

SCHLAGER, N.; WEISBLATT, J. **Alternative Energy**. v.1. Farmington Hills: Thomson Gale, 2006. 165 p.

SCHABER, K.; STEINKE, F.; HAMACHER, T. **Transmission grid extensions for the integration of variable renewable energies in Europe: Who benefits where?** Energy Policy, nº 43, p. 123–135, 2012.

SCHNEIDER, S. **Feeding Management for a Flexible Biogas Production**. 51 p. Student Research Project - Universidade de Stuttgart. Stuttgart, 2015.

SOSNOWSKI, P.; WIECZOREK, A.; LEDAKOWICZ, S. **Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes**. Advances in Environmental Research, nº 7, p. 609–616, 2003.

SOUZA, J. **Desenvolvimento de tecnologias para a compressão de biogás**. 82 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Porto Alegre, 2011.

SZARKA, N.; SCHOLWIN, F.; TROMMLER, M.; JACOBI, H. F.; EICHHORN, M.; ORTWEIN, A.; THRÄN, D. **A novel role for bioenergy: A flexible, demand-oriented power supply**. Energy, nº 61, p. 18-26, 2013.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B.R.; CASE, C.L. **Microbiologia**. 10. ed. Porto Alegre: Artmed, 2012. 967 p.

WANG, G.; GAVALA, H.N., SKIADAS, I.V.; AHRING, B.K. **Wet explosion of wheat straw and codigestion with swine manure: Effect on the methane productivity.** Waste Management, n° 29, p. 2830–2835, 2009.

WARD, A.J.; HOBBS, P.J.; HOLLIMAN, P.J.; JONES, D.L. **Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources.** Bioresource Technology, n° 99, p. 7928–7940, 2008.

WEILAND, P. **Grundlagen der Methangärung: Biologie und Substrate.** VDI-Berichte, n° 1620, p. 19-32, 2001.

WEILAND, P. **Biogas production: current state and perspectives.** Springer, Applied Microbiology Biotechnology, n° 85, p. 849–860, 2010.

WILKINSON, K.G. **A comparison of the drivers influencing adoption of on-farm anaerobic digestion in Germany and Australia.** Biomass Bioenergy, n° 35, p.1613-1622, 2011.

APÊNDICE – DADOS HORÁRIOS BRUTOS

Experimento 1		02/02/2015			03/02/2015			04/02/2015			05/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	50	36	0,70	52	35	0,95	53	39	1,54	53	41	1,88
01:00:00	02:00:00	50	36	0,70	52	35	0,88	53	39	1,56	54	41	1,72
02:00:00	03:00:00	50	36	0,66	53	35	0,89	53	39	1,49	54	41	1,70
03:00:00	04:00:00	51	36	0,68	53	35	0,97	53	39	1,41	54	42	1,74
04:00:00	05:00:00	51	35	0,69	53	35	0,91	54	39	1,44	54	42	1,76
05:00:00	06:00:00	51	35	0,69	53	35	0,97	54	39	1,42	54	42	1,63
06:00:00	07:00:00	51	35	0,66	53	35	1,06	54	39	1,39	54	42	1,67
07:00:00	08:00:00	52	35	0,77	54	35	1,09	54	40	1,36	55	42	1,55
08:00:00	09:00:00	52	35	0,71	54	35	1,26	54	40	1,32	55	42	1,61
09:00:00	10:00:00	52	35	0,76	54	35	1,37	55	40	1,32	55	42	1,52
10:00:00	11:00:00	52	35	0,72	54	35	1,48	55	40	1,29	55	41	1,49
11:00:00	12:00:00	53	35	0,76	54	36	1,50	55	39	1,32	55	42	1,82
12:00:00	13:00:00	53	35	0,69	54	36	1,26	55	39	1,24	56	41	0,06
13:00:00	14:00:00	53	35	0,82	54	36	1,28	56	39	1,44	56	41	0,00
14:00:00	15:00:00	53	35	0,92	54	36	1,61	53	39	1,77	55	41	0,52
15:00:00	16:00:00	52	34	1,18	51	36	2,00	52	39	1,78	53	40	0,00
16:00:00	17:00:00	50	34	0,93	51	36	2,08	52	39	1,93	52	41	0,00
17:00:00	18:00:00	50	34	0,94	51	37	1,90	52	39	1,89	52	41	0,00
18:00:00	19:00:00	50	34	0,80	52	37	1,75	53	40	2,15	53	42	0,00
19:00:00	20:00:00	51	35	0,84	52	38	1,73	53	40	2,06	53	42	0,00
20:00:00	21:00:00	51	35	0,85	52	38	1,79	53	40	2,04	53	43	0,00
21:00:00	22:00:00	51	35	0,81	52	39	1,74	53	41	1,92	52	44	0,00
22:00:00	23:00:00	52	35	0,88	52	39	1,57	53	41	1,99	52	44	0,00
23:00:00	00:00:00	52	35	0,89	53	39	1,56	53	41	1,94	52	45	0,00

Experimento 1		06/02/2015			07/02/2015			08/02/2015			09/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	52	45	0,00	47	51	0,00	54	48	0,00	58	44	0,00
01:00:00	02:00:00	52	46	0,00	47	52	0,00	54	48	0,00	58	44	0,00
02:00:00	03:00:00	52	46	0,00	48	52	0,00	54	48	0,00	58	44	0,00
03:00:00	04:00:00	52	46	0,00	48	52	0,00	54	47	0,00	58	44	0,00
04:00:00	05:00:00	52	46	0,00	48	52	0,00	54	47	0,00	58	44	0,02
05:00:00	06:00:00	52	46	0,00	48	52	0,00	55	47	0,00	58	44	0,00
06:00:00	07:00:00	52	46	0,00	48	52	0,00	55	47	0,00	58	44	0,00
07:00:00	08:00:00	52	46	0,00	49	52	0,00	55	47	0,00	58	44	0,00
08:00:00	09:00:00	52	47	0,00	49	51	0,00	55	47	0,00	58	44	0,00
09:00:00	10:00:00	53	46	0,13	49	51	0,00	55	46	0,00	58	44	0,00
10:00:00	11:00:00	53	46	0,73	50	51	0,00	56	46	0,00	58	44	0,00
11:00:00	12:00:00	53	46	0,19	50	51	0,00	56	46	0,00	58	44	0,01
12:00:00	13:00:00	53	46	0,00	50	51	0,00	56	46	0,00	58	44	0,00
13:00:00	14:00:00	54	46	0,00	50	50	0,00	56	46	0,00	58	44	0,51
14:00:00	15:00:00	54	46	0,85	51	50	0,00	57	45	0,00	58	44	1,17
15:00:00	16:00:00	39	34	2,42	51	50	0,00	57	45	0,00	58	44	1,62
16:00:00	17:00:00	47	44	0,00	51	50	0,00	57	45	0,01	56	43	1,91
17:00:00	18:00:00	47	45	0,00	52	50	0,00	57	45	0,00	55	43	1,88
18:00:00	19:00:00	48	46	0,00	52	49	0,00	57	45	0,00	55	44	1,79
19:00:00	20:00:00	48	47	0,00	52	49	0,00	57	45	0,00	55	44	1,76
20:00:00	21:00:00	48	48	0,00	52	49	0,00	57	45	0,00	55	44	1,75
21:00:00	22:00:00	48	49	0,00	53	49	0,00	57	45	0,00	56	44	1,79
22:00:00	23:00:00	48	50	0,00	53	48	0,00	58	44	0,00	56	44	1,88
23:00:00	00:00:00	48	51	0,00	53	48	0,00	58	44	0,00	56	44	1,91

Experimento 1		10/02/2015			11/02/2015			12/02/2015			13/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	56	44	1,99	50	51	3,98	49	52	3,98	50	51	5,69
01:00:00	02:00:00	56	44	1,99	50	51	3,85	49	52	3,85	49	52	5,82
02:00:00	03:00:00	56	44	2,18	50	51	3,75	49	52	3,75	49	52	6,06
03:00:00	04:00:00	56	44	2,44	50	51	3,71	49	52	3,71	49	53	5,93
04:00:00	05:00:00	56	45	2,66	50	51	3,54	49	52	3,54	49	53	5,53
05:00:00	06:00:00	55	45	3,03	50	51	3,52	50	52	3,52	49	53	5,13
06:00:00	07:00:00	55	45	3,16	50	51	3,35	50	52	3,35	49	53	4,98
07:00:00	08:00:00	55	46	3,29	51	51	3,26	50	52	3,26	49	53	4,66
08:00:00	09:00:00	55	46	2,96	51	51	3,17	50	51	3,17	49	53	4,53
09:00:00	10:00:00	55	46	2,88	51	50	3,12	50	51	3,12	49	53	4,46
10:00:00	11:00:00	54	46	2,58	51	50	3,06	51	51	3,06	46	51	5,61
11:00:00	12:00:00	54	47	2,63	52	50	2,94	51	51	2,94	46	52	5,78
12:00:00	13:00:00	54	47	2,54	51	49	3,67	51	51	3,67	46	52	5,77
13:00:00	14:00:00	54	47	2,60	47	48	4,12	51	50	4,12	46	52	5,76
14:00:00	15:00:00	51	46	3,42	47	48	4,01	50	50	4,01	47	53	5,96
15:00:00	16:00:00	50	46	4,09	48	49	4,09	49	49	4,09	47	53	6,32
16:00:00	17:00:00	50	47	4,55	48	49	4,28	49	50	4,28	47	53	6,63
17:00:00	18:00:00	50	47	4,76	48	50	4,40	49	50	4,40	47	54	6,93
18:00:00	19:00:00	50	48	4,96	49	50	4,71	49	50	4,71	47	54	7,03
19:00:00	20:00:00	50	49	4,78	49	50	5,03	50	50	5,03	47	54	7,15
20:00:00	21:00:00	50	49	4,51	49	50	5,13	50	50	5,13	47	55	7,07
21:00:00	22:00:00	50	50	4,41	49	51	5,26	50	50	5,26	47	55	6,76
22:00:00	23:00:00	50	50	4,34	49	51	5,18	50	51	5,18	47	56	6,51
23:00:00	00:00:00	50	51	4,18	49	52	4,98	50	51	4,98	47	56	6,18

Experimento 1		14/02/2015			15/02/2015			16/02/2015			17/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	47	56	5,88	51	51	2,85	53	50	1,83	51	48	3,53
01:00:00	02:00:00	47	55	5,82	51	51	2,83	53	49	1,66	51	48	3,81
02:00:00	03:00:00	47	55	5,56	51	51	2,71	53	49	1,75	51	48	4,12
03:00:00	04:00:00	48	55	5,52	51	51	2,55	53	49	1,67	51	48	4,66
04:00:00	05:00:00	48	55	5,45	51	51	2,58	53	49	1,6	51	49	5,01
05:00:00	06:00:00	48	55	5,26	52	51	2,61	53	49	1,72	51	49	5,16
06:00:00	07:00:00	48	54	5,23	52	51	2,52	53	49	1,61	51	50	4,82
07:00:00	08:00:00	49	54	5,08	52	51	2,34	53	49	1,53	51	50	4,31
08:00:00	09:00:00	49	54	4,82	52	51	2,41	53	49	1,55	51	50	4,09
09:00:00	10:00:00	49	53	4,74	52	51	2,33	53	49	1,52	51	50	3,82
10:00:00	11:00:00	50	53	4,68	52	50	2,29	53	49	1,55	51	50	3,61
11:00:00	12:00:00	50	53	4,51	52	50	2,13	53	49	1,47	51	50	3,47
12:00:00	13:00:00	50	53	4,33	52	50	2,22	53	49	1,47	51	50	3,25
13:00:00	14:00:00	50	53	4,25	52	50	2,17	54	49	1,55	51	50	3,09
14:00:00	15:00:00	50	52	3,99	52	50	2,11	51	48	2,63	51	50	2,97
15:00:00	16:00:00	51	52	3,84	52	50	2,07	48	47	4,15	48	49	4,20
16:00:00	17:00:00	51	52	3,64	52	50	2,00	48	48	3,89	47	48	5,48
17:00:00	18:00:00	51	52	3,49	52	50	1,80	48	48	3,76	47	48	6,44
18:00:00	19:00:00	51	52	3,17	52	50	1,87	49	48	3,58	47	49	6,74
19:00:00	20:00:00	51	52	3,22	52	50	1,90	49	48	3,51	48	50	7,00
20:00:00	21:00:00	51	51	3,11	53	50	1,85	50	48	3,43	48	51	7,42
21:00:00	22:00:00	51	51	3,00	53	50	1,77	50	48	3,38	48	52	7,81
22:00:00	23:00:00	51	51	2,93	53	50	1,83	50	48	3,34	48	53	8,07
23:00:00	00:00:00	51	51	2,84	53	50	1,77	51	48	3,46	47	53	8,04

Experimento 1		18/02/2015			19/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	47	55	8,19	49	53	8,78
01:00:00	02:00:00	47	55	8,67	49	54	7,82
02:00:00	03:00:00	46	56	9,10	49	54	7,27
03:00:00	04:00:00	46	56	8,83	49	54	6,70
04:00:00	05:00:00	46	57	8,43	49	54	6,27
05:00:00	06:00:00	46	57	8,33	49	54	6,00
06:00:00	07:00:00	45	58	8,19	49	54	5,69
07:00:00	08:00:00	45	59	7,76	50	53	5,51
08:00:00	09:00:00	45	59	7,43	50	53	5,33
09:00:00	10:00:00	45	59	7,10	50	52	5,10
10:00:00	11:00:00	45	59	6,34	51	52	4,99
11:00:00	12:00:00	45	59	5,75	51	52	4,87
12:00:00	13:00:00	45	59	5,39	51	51	4,76
13:00:00	14:00:00	45	58	8,04	52	51	4,66
14:00:00	15:00:00	46	57	8,53	52	50	4,39
15:00:00	16:00:00	47	55	7,75	49	49	7,11
16:00:00	17:00:00	48	54	7,27	49	49	7,24
17:00:00	18:00:00	49	54	7,27	49	50	7,59
18:00:00	19:00:00	49	53	7,46	49	51	7,94
19:00:00	20:00:00	50	52	7,73	49	51	8,52
20:00:00	21:00:00	50	52	8,12	49	52	8,69
21:00:00	22:00:00	50	52	8,54	49	53	8,61
22:00:00	23:00:00	50	52	9,08	48	54	8,30
23:00:00	00:00:00	50	53	9,29	48	54	8,03

Intervalo 1		20/02/2015			21/02/2015			22/02/2015			23/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	47	55	7,70	50	51	4,05	50	50	2,27	52	49	1,66
01:00:00	02:00:00	47	55	7,47	50	51	4,00	50	50	2,24	52	49	1,76
02:00:00	03:00:00	47	55	7,08	49	51	3,92	50	50	2,21	52	49	1,7
03:00:00	04:00:00	48	55	6,90	49	51	3,69	50	50	2,14	51	49	1,62
04:00:00	05:00:00	48	55	6,66	49	51	3,63	51	50	2,15	51	49	1,59
05:00:00	06:00:00	48	55	6,64	49	51	3,52	51	50	2,14	51	49	1,71
06:00:00	07:00:00	48	55	6,53	49	51	3,45	51	50	2,02	51	49	1,58
07:00:00	08:00:00	48	54	6,41	49	51	3,28	51	50	1,98	51	49	1,63
08:00:00	09:00:00	49	54	6,37	49	52	3,27	51	50	2,01	51	49	1,57
09:00:00	10:00:00	49	54	6,29	49	51	3,11	51	50	1,99	51	49	1,61
10:00:00	11:00:00	49	53	6,14	49	51	3,09	51	50	1,92	51	49	1,52
11:00:00	12:00:00	49	53	6,09	49	51	2,96	51	49	1,83	51	49	1,46
12:00:00	13:00:00	49	53	6,01	50	51	2,95	51	50	1,96	51	49	1,53
13:00:00	14:00:00	49	52	5,95	50	51	2,88	51	49	1,91	51	49	1,41
14:00:00	15:00:00	49	52	5,95	50	51	2,84	51	49	1,87	51	49	1,45
15:00:00	16:00:00	49	52	5,86	50	51	2,66	51	49	1,76	51	49	1,37
16:00:00	17:00:00	49	52	5,71	50	51	2,69	51	49	1,82	51	49	1,25
17:00:00	18:00:00	49	52	5,39	50	51	2,55	51	49	1,70	52	49	1,24
18:00:00	19:00:00	50	51	5,14	50	51	2,49	51	49	1,77	52	49	1,18
19:00:00	20:00:00	50	51	5,00	50	51	2,48	51	49	1,64	52	49	1,25
20:00:00	21:00:00	50	51	4,65	50	51	2,41	51	49	1,75	52	49	1,23
21:00:00	22:00:00	50	51	4,49	50	51	2,39	51	49	1,68	52	48	1,25
22:00:00	23:00:00	50	51	4,35	50	51	2,46	51	49	1,74	52	48	1,14
23:00:00	00:00:00	50	51	4,11	50	50	2,38	51	49	1,70	52	48	1,33

Experimento 2		24/02/2015			25/02/2015			26/02/2015			27/02/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	52	48	1,24	52	47	1,86	49	49	2,61	48	50	2,66
01:00:00	02:00:00	52	48	1,20	52	47	1,89	49	49	2,47	48	50	2,69
02:00:00	03:00:00	52	48	1,23	53	47	1,81	49	49	2,42	48	50	2,61
03:00:00	04:00:00	52	48	1,22	53	47	1,71	49	49	2,42	48	50	2,58
04:00:00	05:00:00	52	48	1,12	53	47	1,48	49	49	2,20	48	50	2,42
05:00:00	06:00:00	52	48	1,16	53	47	1,52	49	49	2,22	48	50	2,41
06:00:00	07:00:00	52	48	1,22	53	47	1,65	49	49	2,15	48	50	2,34
07:00:00	08:00:00	52	48	1,04	53	47	1,78	49	49	2,02	49	50	2,32
08:00:00	09:00:00	52	48	1,09	53	47	1,99	49	49	1,97	49	50	2,22
09:00:00	10:00:00	52	48	1,10	53	47	2,26	50	49	1,99	49	50	2,07
10:00:00	11:00:00	52	48	1,12	53	47	2,57	50	49	1,91	49	50	2,06
11:00:00	12:00:00	52	48	1,13	52	47	2,86	50	49	1,94	49	50	1,84
12:00:00	13:00:00	52	48	1,11	52	47	2,86	50	49	1,90	49	50	1,75
13:00:00	14:00:00	52	48	1,10	52	48	2,60	50	49	2,22	47	49	3,21
14:00:00	15:00:00	52	48	1,03	52	48	2,10	46	48	3,57	46	48	3,73
15:00:00	16:00:00	52	48	2,67	50	47	2,77	46	48	4,23	46	49	4,13
16:00:00	17:00:00	51	48	3,79	48	46	4,04	46	48	4,45	47	49	3,94
17:00:00	18:00:00	51	48	3,80	48	47	4,59	47	49	4,34	47	49	4,12
18:00:00	19:00:00	51	48	3,44	48	47	4,64	47	49	4,13	47	49	4,43
19:00:00	20:00:00	52	48	2,79	48	48	4,40	47	49	3,81	48	49	4,75
20:00:00	21:00:00	52	48	2,32	48	48	4,00	47	49	3,33	48	49	4,88
21:00:00	22:00:00	52	48	1,99	48	49	3,61	48	50	3,16	48	50	4,67
22:00:00	23:00:00	52	47	1,84	49	49	3,14	48	50	2,99	48	50	4,35
23:00:00	00:00:00	52	47	1,85	49	49	2,88	48	50	2,81	48	50	4,00

Experimento 2		28/02/2015			01/03/2015			02/03/2015			03/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	48	50	3,68	50	49	1,83	51	49	1,30	50	48	3,16
01:00:00	02:00:00	48	50	3,50	50	49	1,83	51	49	1,37	50	48	3,55
02:00:00	03:00:00	49	50	3,28	50	50	1,86	51	49	1,49	50	48	4,09
03:00:00	04:00:00	49	50	3,06	50	49	1,79	51	49	1,21	50	48	4,02
04:00:00	05:00:00	49	50	2,75	50	49	1,80	51	49	1,17	50	49	3,64
05:00:00	06:00:00	49	50	2,69	50	49	1,76	51	49	1,22	50	49	3,33
06:00:00	07:00:00	49	50	2,59	50	49	1,71	51	49	1,25	50	49	3,01
07:00:00	08:00:00	49	50	2,48	50	49	1,76	51	49	1,10	49	49	2,76
08:00:00	09:00:00	49	50	2,37	50	49	1,69	51	49	1,06	49	49	2,56
09:00:00	10:00:00	49	50	2,22	50	49	1,69	51	49	1,20	50	49	2,44
10:00:00	11:00:00	49	50	2,22	50	49	1,54	51	49	1,12	50	49	2,34
11:00:00	12:00:00	49	50	2,12	50	49	1,45	51	49	1,05	50	49	2,31
12:00:00	13:00:00	50	50	2,10	50	49	1,47	51	49	1,22	50	49	2,29
13:00:00	14:00:00	50	50	1,99	50	49	1,55	51	49	1,02	50	49	2,25
14:00:00	15:00:00	50	50	2,01	51	49	1,41	50	49	2,25	48	49	3,70
15:00:00	16:00:00	50	50	1,96	51	49	1,46	48	47	3,79	45	48	5,72
16:00:00	17:00:00	50	49	1,90	51	49	1,41	48	48	4,12	46	49	6,89
17:00:00	18:00:00	50	49	1,89	51	49	1,38	48	48	3,75	46	50	7,04
18:00:00	19:00:00	50	49	1,86	51	49	1,35	48	48	3,35	46	50	6,92
19:00:00	20:00:00	50	50	1,79	51	49	1,37	49	48	2,74	46	51	6,61
20:00:00	21:00:00	50	49	1,86	51	49	1,36	49	48	2,38	47	51	6,12
21:00:00	22:00:00	50	49	1,86	51	49	1,47	49	48	2,43	47	51	5,80
22:00:00	23:00:00	50	50	1,91	51	49	1,45	50	48	2,56	47	51	5,44
23:00:00	00:00:00	50	49	1,83	51	49	1,33	50	48	2,81	47	51	4,93

Experimento 2		04/03/2015			05/03/2015			06/03/2015			07/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	48	51	4,49	48	52	6,40	48	52	6,66	47	53	8,20
01:00:00	02:00:00	48	51	4,12	48	52	5,75	48	52	6,83	47	53	8,16
02:00:00	03:00:00	48	51	3,76	48	52	5,33	48	52	6,94	47	53	7,73
03:00:00	04:00:00	48	51	3,52	48	52	4,78	48	52	6,74	47	53	7,15
04:00:00	05:00:00	48	51	3,26	48	52	4,34	48	52	6,17	47	54	6,63
05:00:00	06:00:00	49	51	3,22	48	52	4,04	48	52	5,80	47	54	5,88
06:00:00	07:00:00	49	51	3,02	48	52	3,76	48	52	5,28	47	53	5,43
07:00:00	08:00:00	49	51	2,87	48	52	3,61	48	52	4,75	47	53	4,99
08:00:00	09:00:00	49	51	2,76	49	51	3,32	48	52	4,48	47	53	4,70
09:00:00	10:00:00	49	51	2,58	49	51	3,25	48	52	4,23	47	53	4,36
10:00:00	11:00:00	49	51	2,60	49	51	3,10	48	52	4,03	47	53	4,26
11:00:00	12:00:00	49	51	2,38	49	51	3,00	48	52	3,86	47	53	4,12
12:00:00	13:00:00	49	51	2,38	49	51	2,89	48	52	3,78	48	53	3,95
13:00:00	14:00:00	48	51	3,32	49	51	2,84	47	52	4,75	48	53	3,88
14:00:00	15:00:00	45	50	4,97	49	51	2,96	44	51	6,48	48	53	3,67
15:00:00	16:00:00	46	50	6,16	47	50	5,41	45	51	6,57	48	53	3,62
16:00:00	17:00:00	46	50	5,82	46	50	5,77	45	51	6,31	48	53	3,50
17:00:00	18:00:00	47	51	5,78	47	51	5,50	46	52	6,04	48	53	3,39
18:00:00	19:00:00	47	51	5,78	47	51	5,26	46	52	6,12	48	53	3,36
19:00:00	20:00:00	47	51	6,12	48	51	5,16	47	52	6,25	48	53	3,35
20:00:00	21:00:00	47	51	6,38	48	51	5,37	47	52	6,68	48	53	3,27
21:00:00	22:00:00	48	51	6,66	48	51	5,60	47	52	7,17	48	52	3,08
22:00:00	23:00:00	48	51	6,79	48	51	6,00	47	52	7,74	48	52	3,15
23:00:00	00:00:00	48	52	6,74	48	51	6,33	47	52	7,93	48	52	3,16

Experimento 2		08/03/2015			09/03/2015			10/03/2015			11/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	48	52	3,08	50	51	1,89	50	49	4,63	44	56	9,68
01:00:00	02:00:00	48	52	3,01	50	51	1,94	50	50	5,47	44	56	9,25
02:00:00	03:00:00	48	52	2,89	50	51	2,00	50	50	6,48	45	55	9,06
03:00:00	04:00:00	49	52	2,89	50	50	1,80	49	50	7,51	45	55	8,60
04:00:00	05:00:00	49	52	2,82	50	50	1,78	49	51	8,32	46	55	8,13
05:00:00	06:00:00	49	52	2,81	50	50	1,71	49	52	8,32	46	54	7,75
06:00:00	07:00:00	49	52	2,75	50	50	1,61	48	52	7,51	46	54	7,07
07:00:00	08:00:00	49	52	2,79	50	50	1,67	48	52	7,05	47	53	6,40
08:00:00	09:00:00	49	52	2,60	50	50	1,60	48	52	6,57	47	53	5,63
09:00:00	10:00:00	49	52	2,53	50	50	1,63	48	53	6,00	47	53	4,95
10:00:00	11:00:00	49	52	2,51	50	50	1,75	48	53	5,50	48	53	4,43
11:00:00	12:00:00	49	51	2,57	50	50	1,66	48	52	5,11	48	53	4,16
12:00:00	13:00:00	49	51	2,46	50	50	1,71	48	52	4,75	48	52	4,02
13:00:00	14:00:00	49	51	2,39	50	50	2,30	48	52	4,46	48	52	3,80
14:00:00	15:00:00	49	51	2,37	49	50	4,74	44	50	6,06	47	52	5,69
15:00:00	16:00:00	49	51	2,32	49	50	6,22	39	48	8,98	46	52	8,39
16:00:00	17:00:00	49	51	2,24	49	50	6,07	39	50	9,52	47	52	8,79
17:00:00	18:00:00	49	51	2,22	49	50	5,32	40	52	10,27	47	52	9,02
18:00:00	19:00:00	49	51	2,05	49	50	4,48	41	53	11,07	47	52	9,36
19:00:00	20:00:00	49	51	2,08	50	50	3,78	42	54	11,65	47	52	10,11
20:00:00	21:00:00	49	51	2,16	50	49	3,47	43	54	11,25	47	53	10,59
21:00:00	22:00:00	49	51	2,05	50	49	3,45	43	55	10,76	47	53	10,58
22:00:00	23:00:00	49	51	2,02	50	49	3,66	43	56	10,37	47	54	10,32
23:00:00	00:00:00	49	51	1,98	50	49	4,06	44	56	10,06	47	54	9,71

Intervalo 2		12/03/2015			13/03/2015			14/03/2015			15/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	47	54	8,84	48	52	3,48	50	50	2,13	51	49	1,57
01:00:00	02:00:00	47	54	8,17	48	52	3,41	50	50	2,11	51	49	1,44
02:00:00	03:00:00	47	54	7,31	48	52	3,36	50	50	2,02	51	49	1,47
03:00:00	04:00:00	47	53	6,54	49	52	3,26	50	50	1,89	51	49	1,39
04:00:00	05:00:00	47	53	6,00	49	52	3,10	50	50	1,92	52	48	1,39
05:00:00	06:00:00	47	53	5,72	49	52	3,18	50	50	1,93	52	48	1,42
06:00:00	07:00:00	48	53	5,59	49	52	3,04	50	50	1,93	52	48	1,46
07:00:00	08:00:00	48	53	5,46	49	52	3,03	50	50	1,81	52	48	1,46
08:00:00	09:00:00	48	53	5,42	49	52	2,89	51	49	1,84	52	48	1,39
09:00:00	10:00:00	48	53	5,20	49	51	2,85	51	49	1,70	52	48	1,25
10:00:00	11:00:00	48	53	5,17	49	51	2,89	51	49	1,85	52	48	1,45
11:00:00	12:00:00	48	53	5,02	49	51	2,70	51	49	1,66	52	48	1,36
12:00:00	13:00:00	48	53	4,79	49	51	2,79	51	50	1,74	52	48	1,25
13:00:00	14:00:00	48	53	4,67	49	51	2,56	51	49	1,63	52	48	1,34
14:00:00	15:00:00	48	53	4,45	49	51	2,56	51	49	1,63	52	48	1,39
15:00:00	16:00:00	48	52	4,31	49	51	2,54	51	49	1,61	52	48	1,25
16:00:00	17:00:00	48	53	4,21	49	51	2,44	51	49	1,55	52	48	1,38
17:00:00	18:00:00	48	52	4,06	49	51	2,38	51	49	1,56	52	48	1,34
18:00:00	19:00:00	48	52	3,83	50	51	2,28	51	49	1,49	52	48	1,20
19:00:00	20:00:00	48	52	3,79	50	51	2,38	51	49	1,50	52	48	1,33
20:00:00	21:00:00	48	52	3,64	50	51	2,25	51	49	1,56	52	48	1,24
21:00:00	22:00:00	48	52	3,74	50	50	2,21	51	49	1,48	52	48	1,21
22:00:00	23:00:00	48	52	3,61	50	50	2,06	51	49	1,49	52	48	1,16
23:00:00	00:00:00	48	52	3,55	50	50	2,20	51	49	1,48	52	48	1,16

Experimento 3		16/03/2015			17/03/2015			18/03/2015			19/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	52	48	1,28	52	47	1,48	49	49	2,75	49	49	2,90
01:00:00	02:00:00	52	48	1,13	52	47	1,50	49	49	2,51	49	49	2,87
02:00:00	03:00:00	52	48	1,41	52	47	1,49	49	49	2,51	49	49	2,77
03:00:00	04:00:00	52	48	1,17	52	47	1,42	49	49	2,33	49	49	2,60
04:00:00	05:00:00	52	48	1,12	52	47	1,50	49	49	2,24	49	49	2,50
05:00:00	06:00:00	52	48	1,17	52	47	1,61	49	49	2,22	49	49	2,49
06:00:00	07:00:00	52	48	1,11	52	47	1,66	50	49	2,23	49	49	2,30
07:00:00	08:00:00	52	48	1,31	52	47	1,75	50	49	2,12	50	49	2,38
08:00:00	09:00:00	52	48	1,26	52	47	1,99	50	49	2,13	50	49	2,36
09:00:00	10:00:00	52	48	1,12	52	47	2,11	50	49	2,10	50	49	2,22
10:00:00	11:00:00	52	48	0,99	52	47	2,73	50	49	2,08	50	49	2,25
11:00:00	12:00:00	52	48	1,16	52	47	2,89	50	49	2,06	50	49	2,22
12:00:00	13:00:00	52	48	1,18	52	47	3,18	50	49	2,04	50	49	2,06
13:00:00	14:00:00	52	48	1,66	52	47	2,98	49	49	2,00	50	49	2,19
14:00:00	15:00:00	51	48	3,53	50	47	3,65	49	49	2,48	48	48	3,75
15:00:00	16:00:00	51	48	5,22	47	46	4,42	47	48	3,76	47	48	4,55
16:00:00	17:00:00	51	48	4,90	47	47	4,67	47	48	4,49	47	48	5,36
17:00:00	18:00:00	51	48	3,51	48	47	4,79	48	48	4,62	47	49	5,47
18:00:00	19:00:00	52	48	2,06	48	48	4,48	48	49	4,45	48	49	5,61
19:00:00	20:00:00	52	47	1,53	48	48	4,02	48	49	4,02	48	49	5,47
20:00:00	21:00:00	52	47	1,59	48	48	3,62	48	49	3,67	48	50	5,14
21:00:00	22:00:00	52	47	1,57	49	48	3,36	48	49	3,51	48	50	4,70
22:00:00	23:00:00	52	47	1,55	49	49	3,00	49	49	3,11	48	50	4,32
23:00:00	00:00:00	52	47	1,45	49	49	2,88	49	49	3,07	48	50	4,09

Experimento 3		20/03/2015			21/03/2015			22/03/2015			23/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	49	50	3,78	48	51	4,36	50	50	2,02	51	49	1,74
01:00:00	02:00:00	49	50	3,60	48	51	4,04	50	50	2,17	51	49	1,64
02:00:00	03:00:00	49	50	3,51	48	51	3,89	50	50	2,18	51	48	1,61
03:00:00	04:00:00	49	50	3,34	48	51	3,77	50	50	2,01	51	48	1,46
04:00:00	05:00:00	49	50	3,14	48	51	3,68	50	50	1,98	51	48	1,47
05:00:00	06:00:00	49	50	3,14	48	51	3,60	50	50	2,01	51	48	1,59
06:00:00	07:00:00	49	50	3,01	49	51	3,51	50	50	1,86	51	48	1,49
07:00:00	08:00:00	49	50	2,87	49	51	3,48	50	50	1,96	51	48	1,38
08:00:00	09:00:00	49	50	2,85	49	51	3,37	50	49	1,96	51	48	1,55
09:00:00	10:00:00	49	50	2,88	49	51	3,28	50	49	1,82	51	48	1,52
10:00:00	11:00:00	49	50	2,66	49	51	3,04	50	49	1,84	51	48	1,41
11:00:00	12:00:00	49	50	2,62	49	51	3,04	50	49	1,97	51	48	1,44
12:00:00	13:00:00	49	50	2,66	49	50	2,85	50	49	1,90	51	48	1,35
13:00:00	14:00:00	48	50	3,14	49	50	2,67	51	49	1,79	51	48	1,49
14:00:00	15:00:00	45	48	4,44	49	50	2,72	51	49	2,00	51	48	1,96
15:00:00	16:00:00	45	49	5,30	49	50	2,47	51	49	1,75	49	48	4,11
16:00:00	17:00:00	46	49	5,78	49	50	2,33	51	49	1,71	49	48	4,72
17:00:00	18:00:00	46	49	5,81	49	50	2,36	51	49	1,73	50	48	3,88
18:00:00	19:00:00	47	50	5,94	49	50	2,24	51	49	1,62	50	48	3,01
19:00:00	20:00:00	47	50	6,29	49	50	2,21	51	49	1,64	50	48	2,58
20:00:00	21:00:00	47	50	6,28	50	50	2,11	51	49	1,59	50	48	2,80
21:00:00	22:00:00	47	51	6,06	50	50	2,18	51	49	1,53	50	48	2,77
22:00:00	23:00:00	47	51	5,54	50	50	2,26	51	49	1,52	50	48	2,91
23:00:00	00:00:00	48	51	4,85	50	50	2,06	51	49	1,62	50	48	3,02

Experimento 3		24/03/2015			25/03/2015			26/03/2015		
Início	Término	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)	% CH ₄	%CO ₂	Vol. (l)
00:00:00	01:00:00	50	48	3,30	46	52	6,07	47	53	6,40
01:00:00	02:00:00	50	48	3,58	47	52	5,69	47	53	5,85
02:00:00	03:00:00	50	48	3,85	47	53	5,42	47	53	5,61
03:00:00	04:00:00	50	49	4,00	47	52	5,22	47	53	5,33
04:00:00	05:00:00	50	49	3,86	47	52	4,97	47	52	5,21
05:00:00	06:00:00	50	49	3,38	47	53	4,82	47	52	5,06
06:00:00	07:00:00	50	49	3,19	47	52	4,63	47	52	4,76
07:00:00	08:00:00	50	49	2,78	47	52	4,26	47	52	4,57
08:00:00	09:00:00	50	49	2,90	48	52	3,97	48	52	4,37
09:00:00	10:00:00	50	49	2,84	48	52	3,68	48	52	4,21
10:00:00	11:00:00	50	49	2,76	48	52	3,62	48	52	4,09
11:00:00	12:00:00	50	50	2,91	48	52	3,45	48	52	3,91
12:00:00	13:00:00	49	50	2,83	48	52	3,41	48	52	3,63
13:00:00	14:00:00	49	50	2,76	48	52	3,25	48	52	3,58
14:00:00	15:00:00	49	50	2,71	47	51	4,74			
15:00:00	16:00:00	46	49	5,55	44	50	8,51			
16:00:00	17:00:00	45	49	7,36	44	50	9,33			
17:00:00	18:00:00	45	50	8,80	45	51	9,70			
18:00:00	19:00:00	45	50	9,17	45	51	10,21			
19:00:00	20:00:00	46	51	9,25	46	52	10,15			
20:00:00	21:00:00	46	52	8,69	46	52	9,57			
21:00:00	22:00:00	46	52	8,01	46	53	8,83			
22:00:00	23:00:00	46	52	7,47	46	53	8,04			
23:00:00	00:00:00	46	52	6,71	46	53	7,16			